

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne démocratique et populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

HADJEB Karima

&

MEZZAR Ismahan

pour l'obtention du diplôme de Master en Électronique option Automatique

Thème

Optimisation des performances d'un système hybride de conversion d'énergies renouvelable-fossile par la méthode des essais de particules

Proposé par : CHEGGAGA Nawal & FODHIL Fadhila

Année Universitaire 2014-2015

ملخص:

هذا العمل يطرح منهجية تصميم نظام هجين (الكهروضوئي، ديزل) لكهربة موقع ريفي معزول في الجزائر وتستند هذه المنهجية استمثال عناصر السرب OEP

هذا العمل يظهر الدراسة التحليلية و الفنية و الاقتصادية للأداء التقني والاقتصادي للنظام الهجين لموقع قرية ريفية في الصحراء تدعى 'إلمان' الخصائص المأخوذة بعين الاعتبار في هذه الدراسة:

الموارد, الاستهلاك, تكلفة كل عنصر, عدد البطاريات, عدد اللوحات و قدرة المولد.

كلمات المفاتيح: نظام الكهروضوئي, النظام الهجين, سرب الجسيمات الامثل

Résumé :

Ce travail présente une méthodologie de dimensionnement d'un système hybride PV-Diesel pour électrifier un site rural isolé en Algérie. Cette méthodologie est basée sur l'optimisation méta heuristique par essaim de particules OEP. L'étude technico-économique effectuée montre une analyse technique et économique des performances du système PV-Diesel-Batterie pour le site du village rural saharien isolé "Ilamane". Les paramètres de configuration sont : les ressources, la charge, le cout de chaque élément, le nombre de batterie, nombre de panneaux et la capacité du groupe électrogène.

Mots clés : Système PV; système hybride ; optimisation par essaim particulaire (OEP).

Abstract :

This work presents a design methodology of a hybrid system PV-Diesel to electrify an isolated rural site in Algeria. This methodology is based on the meta heuristic particles swarm optimization PSO. The techno-economic study presents a technical and economic performance analysis of PV-diesel-battery system for the site "Ilamane" which is an isolates rural Saharan village. The configuration parameters are: resources, load, the cost of each element, the number of battery, number of panels and the capacity of the generator.

Keywords: PV system; hybrid system; particle swarm optimization (PSO).

Remerciements

Nous remercions le bon Dieu de nous avoir donné la volonté et la patience qui nous ont permis de mener à bien ce travail.

Nous tenons à exprimer mes remerciements à mon encadreur *M^{me}* .N .CHEGGAGA qui a proposé et a dirigé ce travail.

Nous tenons aussi à exprimer ma profonde gratitude au *M^{me}* F.FODHIL pour tous ses conseils.

Nous remercions monsieur le président de jury, ainsi que les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Nous tenons à remercier les responsables et tout le personnel du département d'Electronique.

Nos remerciements vont également à tous mes enseignants de l'université.

Nous remercions tous nos amis et toutes les personnes qui nous ont soutenus durant ces années. Sans eux, le travail accompli n'aurait pas la même saveur.

Enfin, nos remerciements vont à toute la famille HADJEB et toute la famille MEZZAR, qui nous ont accompagnés tout au long de nos études par leur amour inconditionnel et leur soutien constant.

Listes des acronymes et abréviations :

A	facteur d'idéalité relative au module
AUT	autonomie du système (Jours)
B	Irradiation solaire directe ($\text{W.m}^{-2}.\text{durée}^{-1}$)
B*	Eclairement solaire directe (W.m^{-2})
C_{Batmax}	La capacité maximale (Ah)
C_{Batmin}	La capacité minimale (Ah).
D	irradiation solaire diffuse ($\text{W.m}^{-2}.\text{durée}^{-1}$).
D*	Eclairement solaire diffuse (W.m^{-2}).
DOD	profondeur de décharge
E_0	constant solaire (W.m^{-2})
E	Flux de rayonnement solaire reçu par unité de surface (W.m^{-2})
E_{Bmin}	seuil minimal de l'énergie disponible dans la batterie
ET	équation du temps (h).
G	Irradiation solaire globale ($\text{W.m}^{-2}.\text{durée}^{-1}$).
G*	Eclairement solaire globale (W.m^{-2}).
h	hauteur du Soleil (°).
I_0	courant de saturation (Ampères).
J	n° du jour de l'année
K	constante de Boltzmann ($1.38.10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$).
L	latitude (°).
l	longitude (°).
ℓ	largeur (m).
l_{ref}	longitude de référence du fuseau horaire (°)
LPS	Loss of Power Supply.
LPSP	Loss of Power Supply probability.
n_b	nombre des batteries
N_{PV}	le nombre de modules photovoltaïques.
PCI_v	énergie contenue dans un litre de combustible
P_{GE}^0	puissance nominale du groupe.
q	charge de l'électron ($1.602.10^{-19}$ Coulomb)
Q_{GE}	Consommation de groupe
Q_v^0	consommation à cette puissance nominale
Q_v^0/P_G^0	consommation spécifique du groupe
R_i	résistance de la batterie (Ω).
R_s	résistance série du module (Ω).
R_{Sh}	résistance parallèle du module (Ω).
t	temps (s).
T	température (°C).
TCF	temps civil du fuseau (h).
T_j	température de la jonction (°C).

TL	temps légal (h).
TS	temps solaire (h).
TU	temps universel (h).
V	tension
V_{bat}	la tension nominale de la batterie (volts).
V_d	la tension directe de conduction de la diode (volts).
V_{ec}	tension de saturation (volts).
V_g	tension de gassing (volts).
V_m	tension max (volts).
V_{oc}	tension du circuit ouvert (volts).
V_{soc}	tension d'un groupement des cellules en série (volts).
η_{bat}	rendement de la batterie.
$\eta_{B,ch}$	le rendement de charge de la batterie.
η_{GE}	rendement du groupe électrogène.
η_{ond}	le rendement de l'onduleur.
δ	déclinaison (°).
σ	taux d'insolation.
β	azimut (°).
w	coefficient d'inertie.
c1 et c2	coefficients d'accélération.
r1 et r2	nombres aléatoires uniformément dans [0, 1].
v	la vitesse.
x	la position.
EF	Facteur d'émission.
E_l	L'énergie de load.
ACS	Le coût actuel net.
ACC	le coût en capital.
ARC	le coût de remplacement.
AFC	le coût du carburant
AOM	le coût de maintenance

Table des matières :

	INTRODUCTION GENERALE	1
1	Généralité sur le système photovoltaïque	4
1.1	Introduction	4
1.2	La ressource solaire	4
1.3	L'énergie solaire	5
1.4	Aspects géométriques	6
1.4.1	Mouvements de la Terre	6
1.4.2	Mouvement apparent du Soleil	7
1.4.3	Heures et temps	9
1.4.4	Durée et taux d'ensoleillement	12
1.5	Aspects énergétiques	13
1.5.1	Rayonnement solaire	13
1.5.2	Variations et types du rayonnement	15
1.6	Le gisement solaire en Algérie	16
1.7	Conclusion	16
2	Système D'énergie Hybride	17
2.1	Introduction	17
2.2	définitions systèmes hybrides	18
2.2.1	Systèmes photovoltaïques non connectés au réseau	18
2.2.1.1	Systèmes photovoltaïques autonomes (SAPV)	19
2.2.1.2	Systèmes photovoltaïques autonomes hybrides	20
2.2.2	Caractérisation et tache des systèmes hybrides	21
2.3	Configuration parallèle ou multi master	21
2.4	Modélisation des composants	24
2.4.1	Modélisation du générateur photovoltaïque	24
2.4.2	Modélisation du système de stockage	26
2.4.3	Modélisation de la consommation en fuel du groupe électrogène	27
2.5	Dimensionnement du système	29
2.5.1	Description de la méthode LPSP	29
	Modèle de simulation	30
2.6	Conclusion	32
3	Optimisation par essaim particulière	33
3.1	Introduction	33
3.2	Méta-heuristiques pour l'optimisation mono-objectif difficile	34
3.2.1	Problème d'optimisation	34
3.2.2	Optimisation difficile	34
3.2.3	Algorithmes d'optimisation approchée	35
3.2.3.1	Heuristiques	35

	3.2.3.2	Méta-heuristiques	36
	3.3	Optimisation par Essaim Particulaire	38
	3.3.1	Principe général	38
	3.3.2	Formalisation	39
	3.4	Notion de voisinage de PSO	41
	3.4.1	Voisinage géographique	42
	3.4.2	Voisinage social	43
	3.5	Différents modèles de topologies	44
	3.5.1	Topologies statiques	44
	3.5.2	Topologies dynamiques	46
	3.6	Coefficient d'inertie	46
	3.7	Conclusion	47
4		Dimensionnement	48
	4.1	Introduction	48
	4.2	Présentation des Ressources météorologiques et profil de charge	48
	4.2.1	Présentation de site	48
	4.2.2	Les données météorologiques utilisées	49
	4.2.3	Le profil de charge	50
	4.3	Les différents éléments du système	53
	4.3.1	L'onduleur	53
	4.3.2	Les batteries	53
	4.3.3	Régulateur de charge	53
	4.3.4	Générateur photovoltaïque	54
	4.4	Dimensionnement du système	55
	4.4.1	Dimensionnement du générateur photovoltaïque sous Matlab	55
	4.4.2	Simulation du comportement du système	58
	4.5	Discussion des résultats	60
	4.6	Conclusion	61
		Conclusion générale	62
		Bibliographie	64

Liste des figures :

- Figure 1.1** Répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère
- Figure 1.2** Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil
- Figure 1.3** Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L
- Figure 1.4** Position du Soleil en fonction de la hauteur et l'azimut
- Figure 1.5** Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich
- Figure 1.6** Equation du temps ET et déclinaison δ en fonction du jour de l'année
- Figure 1.7** Types de rayonnement solaire reçus au sol
- Figure 1.8** Variation type de l'éclairement solaire au cours d'une journée non-perturbée
- Figure 2.1** Système photovoltaïque autonome
- Figure 2.2** Exemple d'architecture électrique d'un système photovoltaïque autonome hybride
- Figure 2.3** Configuration PV/Diesel parallèle
- Figure 2.4** Différentes architectures de la configuration PV/Diesel parallèle
- Figure 2.5** Schéma équivalent d'un module photovoltaïque
- Figure 2.6** Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique $I = f(V)$ pour une température constante
- Figure 2.7** Influence de la température sur la caractéristique $I = f(V)$ Pour un éclairement solaire constant
- Figure 2.8** Schéma électrique équivalent de nb éléments de batteries en série
- Figure 2.9** Caractéristique de décharge
- Figure 2.10** Caractéristique de charge
- Figure 3.1** Déplacement d'une particule
- Figure 3.2** Topologies statiques : (a) Topologie Gbest, (b) Topologie en anneau (ou Ring) utilisée dans Lbest, (c) Topologie en étoile (ou Wheel), (d) Topologie Von Neumann et (e) topologie Four-clusters
- Figure 4.1** caractéristiques climatiques du site
- Figure 4.2** Organigramme de simulation de PSO
- Figure 4.3** Organigramme de l'algorithme de PSO
- Figure 4.4** Convergence de l'algorithme de PSO

Liste des tableaux :

- Tableau 1.1** Rayonnement solaire sur un plan horizontal
- Tableau 1.2** L'ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique
- Tableau 2.1** Description de la zone de fonctionnement des batteries
- Tableau 4.1** Profil de consommation utilisé dans notre étude
- Tableau 4.2** Profil de consommation énergétique horaire
- Tableau 4.3** Les caractéristiques électriques du module Atersa 75A sous les conditions standards (STC)
- Tableau 4.4** Les paramètres économiques du système
- Tableau 4.5** Résultats du dimensionnement
- Tableau 4.6** Bilan énergétique du système
- Tableau 4.7** Bilan économique du système

Introduction général

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis la nuit des temps. Elles constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural où elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire [1].

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement. De nos jours, une grande partie de la production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les générations futures. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue [1].

La problématique, celle des sites isolés, plus de deux milliards de personnes disséminées dans des régions isolées. Dans ces secteurs l'approvisionnement électrique dépend seulement des systèmes de génération diesel autonomes, outre le coût de carburants ne cesse d'augmenter, ce qui rend la production d'électricité économiquement très dispendieuse, ce qui traduit l'application d'une solution parfaite comme une production d'énergie décentralisée [2].

Un système hybride de génération d'énergie électrique est un choix remarquable pour pallier aux problèmes d'alimentation des sites isolés, sa combinaison de plusieurs sources génère une particularité. La diversification en termes de sources d'énergie pour ce système

reste un avantage majeur pour limiter le problème de fluctuation des sources renouvelables. Cependant leur installation nécessite une étude de dimensionnement des organes représentant le système pour définir un fonctionnement idéal.

L'un des principes les plus fondamentaux de notre monde, qui occupe aussi une place importante dans le monde informatique, industriel, etc., est la recherche d'un état optimal.

En effet, de nombreux problèmes scientifiques, sociaux, économiques et techniques ont des paramètres qui peuvent être ajustés pour produire un résultat plus souhaitable. Ceux ci peuvent être considérés comme des problèmes d'optimisation et leur résolution est un sujet central en recherche opérationnelle. Des techniques ont été conçues pour résoudre ces problèmes, notamment les problèmes « difficiles » (par exemple ceux qui présentent de nombreux extrema locaux pauvres), en déterminant des solutions qui ne sont pas rigoureusement optimales, mais qui s'en approchent. Ces méthodes, appelées heuristiques et méta-heuristiques, se basent généralement sur des phénomènes physiques, biologiques, socio-psychologiques, et peuvent faire appel au hasard.

Notre sujet propose une approche d'optimisation d'un système hybride qui utilise des sources d'énergies renouvelable et fossile, Par méthode optimisation par essais de particules PSO. Le système hybride étudié comprend (des panneaux, des batteries, la charge, groupe diesel) afin de fournir un service d'énergie de qualité pour population rural.

Pour cela le présent mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre renferme une description générale, et le principe de fonctionnement de système solaire et photovoltaïque.

Le second chapitre aborde le concept théorique de l'énergie hybride avec modélisation de chaque composant du système étudié.

Le troisième chapitre est consacré aux techniques d'intelligence par Essaim Particulaire (OEP).

Dans le quatrième chapitre nous présentons les résultats des simulations et optimisation du système hybride photovoltaïque par la méthode de PSO. À l'aide d'un programme de simulation réalisé sous Matlab pour le site de d'ilamane (latitude 23.12 N- longitude 5.27 E) Tamanrasset.

Nous terminerons ce modeste travail par une conclusion générale qui résume notre étude.

Chapitre 1 : Généralité sur le système photovoltaïque

1.1. Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'énergie récupérée et transformée directement en électricité à partir de la lumière du soleil par des panneaux photovoltaïques. En outre, cette énergie est une source non polluante. Modulaires, ses composants se prêtent bien à une utilisation innovante et esthétique en architecture. Ainsi que le coût de maintenance est faible, et elle répond parfaitement aux besoins des sites isolés.

1.2. La ressource solaire :

Le soleil est une sphère gazeuse composée presque totalement d'hydrogène. Son diamètre est de 1 391 000 Km (100 fois celui de la Terre), sa masse est de l'ordre de $1,9891 \times 10^{30}$ kg. Toute l'énergie du Soleil provient de réactions thermonucléaires qui s'y produisent. Elles transforment à chaque seconde $564 \cdot 10^6$ tonnes d'hydrogène en $560 \cdot 10^6$ tonnes d'Hélium, la différence de 4 millions de tonnes est dissipée sous forme d'énergie, ce qui représente une énergie totale de $36 \cdot 10^{22}$ W. La Terre étant à une distance de $150 \cdot 10^6$ Km du Soleil, elle reçoit une énergie de $1,8 \cdot 10^{17}$ W. La valeur du flux de rayonnement solaire E reçu par une surface perpendiculaire aux rayons solaires placée à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre (soit à environ 80 Km d'altitude) varie au cours de l'année avec la distance Terre/Soleil. Sa valeur moyenne E_0 est appelée la constante solaire, elle vaut $E_0 = 1367$ W/m² [3].

En première approximation, on peut calculer la valeur de E en fonction du numéro du jour de l'année j par :

$$E = E_0 [1 + 0.333 \cos(0.984 j)] \quad \dots\dots\dots (1.1)$$

La figure (1.1) représente la répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère en fonction de la longueur d'onde. Cette répartition du rayonnement solaire montre que 98% du rayonnement solaire est émis dans des longueurs d'onde inférieures à 4 μm [4].

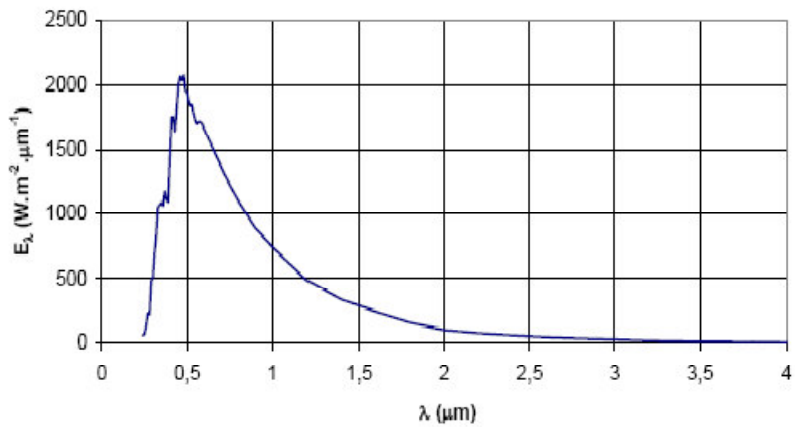


Figure 1.1 : Répartition spectrale du rayonnement solaire hors atmosphère [4].

1.3. L'énergie solaire :

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (KWc/m²) répartie sur tout le spectre, de l'ultraviolet à l'infrarouge [5].

Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année. L'énergie solaire est produite et utilisée selon plusieurs, procédés:

- L'énergie solaire thermique : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux sombres. On peut aussi produire de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.
- L'énergie solaire photovoltaïque : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide de panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant

pas de ressources énergétiques conventionnelles tels que les hydrocarbures ou le charbon [5].

1.4. Aspects géométriques

L'étude des aspects géométriques du rayonnement solaire reçu par la Terre est indispensable pour calculer le rayonnement solaire reçu par un plan incliné placé à la surface de la Terre et orienté dans une direction donnée. La connaissance du rayonnement solaire est la base du dimensionnement de tout système solaire.

1.4.1. Mouvements de la Terre :

La trajectoire de la Terre autour du Soleil est une ellipse dont le Soleil est l'un des foyers. Le plan de cette ellipse est appelé *l'écliptique*. L'excentricité de cette ellipse est faible ce qui fait que la distance Terre/Soleil ne varie que de $\pm 1,7\%$ par rapport à la distance moyenne qui est de 149 675 106 Km [6].

La Terre tourne également sur elle-même autour d'un axe appelé l'axe des pôles. Le plan perpendiculaire à l'axe des pôles et passant par le centre de la Terre est appelé *l'équateur*. L'axe des pôles n'est pas perpendiculaire à l'écliptique : l'équateur et l'écliptique font entre eux un angle appelé *inclinaison* et qui vaut $23^{\circ}27'$ [6]. Les mouvements de la Terre autour de son axe et autour du Soleil sont schématisés sur la figure (1.2).

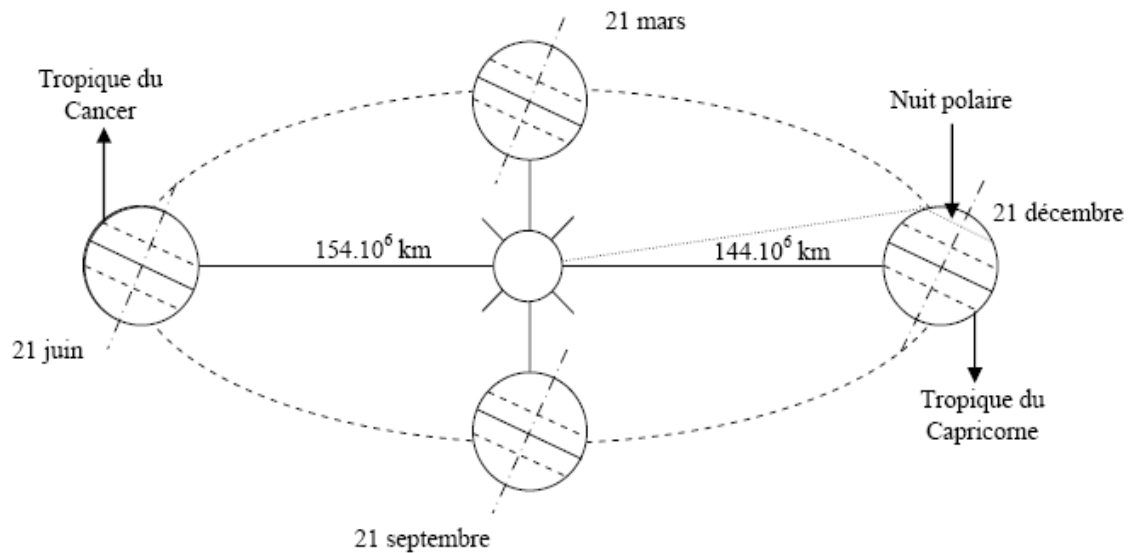


Figure 1.2 : Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil [6].

La déclinaison δ est l'angle formé par la direction du soleil avec le plan équatorial. Elle traduit l'inclinaison du plan équatorial par rapport au plan écliptique. Elle varie au cours de l'année entre $-23,45^\circ$ et $+23,45^\circ$. Elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre), maximale au solstice d'été (21 juin) et minimale au solstice d'hiver (21 décembre). La valeur de la déclinaison peut être calculée par la relation [7,8]:

$$\delta = 23.45 \cdot \sin\left(2\pi \frac{284 + j}{365}\right) \quad \dots\dots\dots (1.2)$$

1.4.2. Mouvement apparent du Soleil :

Le mouvement apparent du Soleil vu par un observateur fixe en un point de latitude L au nord de l'équateur est représenté sur la figure (1.3).

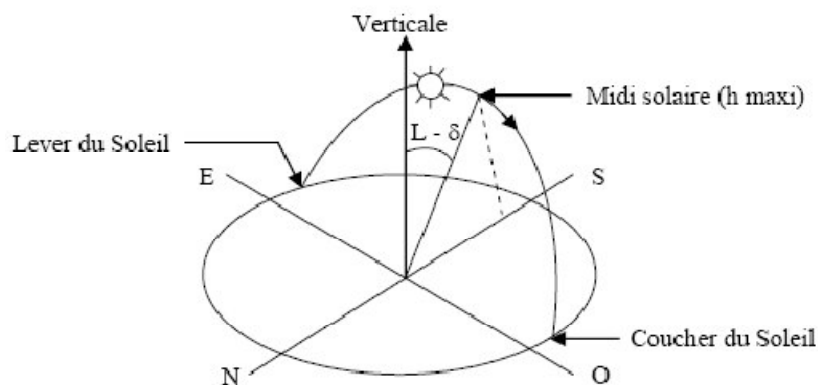


Figure 1.3 : Mouvement apparent du Soleil observé d'un point de latitude L [6].

Au midi solaire, l'angle que fait la direction du Soleil avec la verticale du lieu est égal à

$(L - \delta)$. La durée du jour est de 12h aux équinoxes, elle est inférieure à 12h entre le 21 septembre et le 21 mars, supérieure à 12h entre le 21 mars et le 21 septembre.

La position du soleil dans le ciel est repérée par l'intermédiaire de deux angles :

- **La hauteur angulaire (h)** : Qui détermine la longueur de la traversée de la l'atmosphère est l'angle formé par la direction de soleil et le plan horizontal. Sa valeur sera comprise entre 24h (au lever et au coucher) et maximum au zénith (midi en temps solaire vrai) [7,8].

Quand le sinus est négatif, c'est que le soleil n'est pas encore levé (la durée des journées varie dans l'année). Il faut donc écrêter cette variable [9].

$$\sin(h) = \sin(L) \sin(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(\omega) \quad \dots\dots\dots (1.3)$$

- **Azimet du soleil (α)** : Angle que fait la projection de la direction du soleil avec la direction du sud. Cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest [7,8].

$$\sin(\alpha) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad \dots\dots\dots (1.4)$$

Ces deux angles sont représentés sur la figure (1.4).

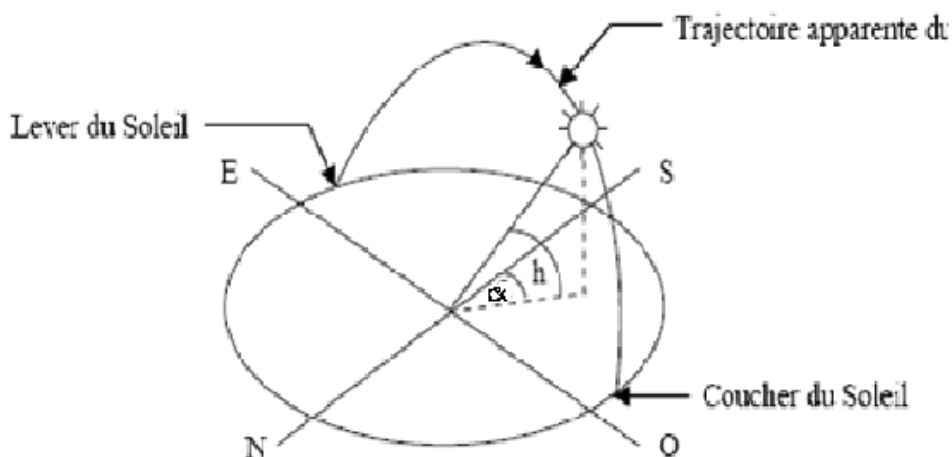


Figure 1.4 : Position du Soleil en fonction de la hauteur et l'azimet [6].

Ces deux angles sont en fonction de :

- La latitude L du lieu
- La date j (numéro du jour de l'année)
- L'heure solaire TS dans la journée.

La latitude L et la date j servent à déterminer la trajectoire du soleil dans le ciel et l'heure TS donne la position instantanée sur cette trajectoire.

Le jour est défini comme le temps mis par la Terre pour effectuer un tour sur elle-même. Un jour a été divisé en 24h et l'heure solaire TS est défini en fixant $TS = 12h$ lorsque la hauteur du Soleil est maximale, le soleil est à son « zénith ».

Egalement, l'angle horaire ω est défini par la relation suivante [3] :

$$\omega = 15(TS - 12) \quad \dots\dots\dots (1.5)$$

ω est compté positivement l'après-midi.

1.4.3. Heures et temps :

- Durée du jour :

Le module ω_1 de l'angle horaire au lever du Soleil s'obtient en écrivant $\sin(h)=0$ dans la formule (1.3), ce qui conduit à :

$$\cos(\omega_1) = -\tan(L) \tan(\delta) \quad \dots\dots\dots (1.6)$$

L'heure solaire au lever du soleil a donc pour valeur [9]:

$$(TS)_l = 12 - \frac{\omega_1}{15} \quad \dots\dots\dots (1.7)$$

L'angle horaire ω_c au coucher du soleil est l'opposé de l'angle horaire à son lever, nous avons donc $\omega_c = -\omega_l$ et la durée du jour vaut :

$$d = 2 \frac{\omega_l}{15} \dots\dots\dots (1.8)$$

-Relation entre temps légal et temps solaire :

Les relations se rapportant au mouvement du Soleil utilisent le temps solaire TS qui diffère généralement du temps légal TL (heure des montres) du lieu considéré. Cette différence est liée à :

- La différence (fixée par chaque pays) entre l'heure légale TL et l'heure civile TCF du fuseau horaire dans lequel il se trouve soit [10]:

$$C = TL - TCF \dots\dots\dots (1.9)$$

L'heure civile TCF du fuseau horaire est égale au temps universel TU (temps solaire du méridien de Greenwich) augmenté de la valeur du décalage horaire que l'on trouvera sur la figure (1.5).

- La variation de la vitesse de la Terre sur sa trajectoire autour du soleil qui introduit un terme correctif appelé équation du temps et noté ET :

$$ET = \left[\begin{array}{l} 0.0002 - 0.4797 \cos(\omega' j) + 3.2265 \cos(2\omega' j) + 0.0903 \cos(3\omega' j) + \\ 7.3509 \sin(\omega' j) + 9.3912 \sin(2\omega' j) + 0.3361 \sin(3\omega' j) \end{array} \right] \dots\dots\dots (1.10)$$

Où : N est le numéro du jour dans l'année.

$$\omega' = 0,984$$

ET Équation du temps (terme correctif) en mn

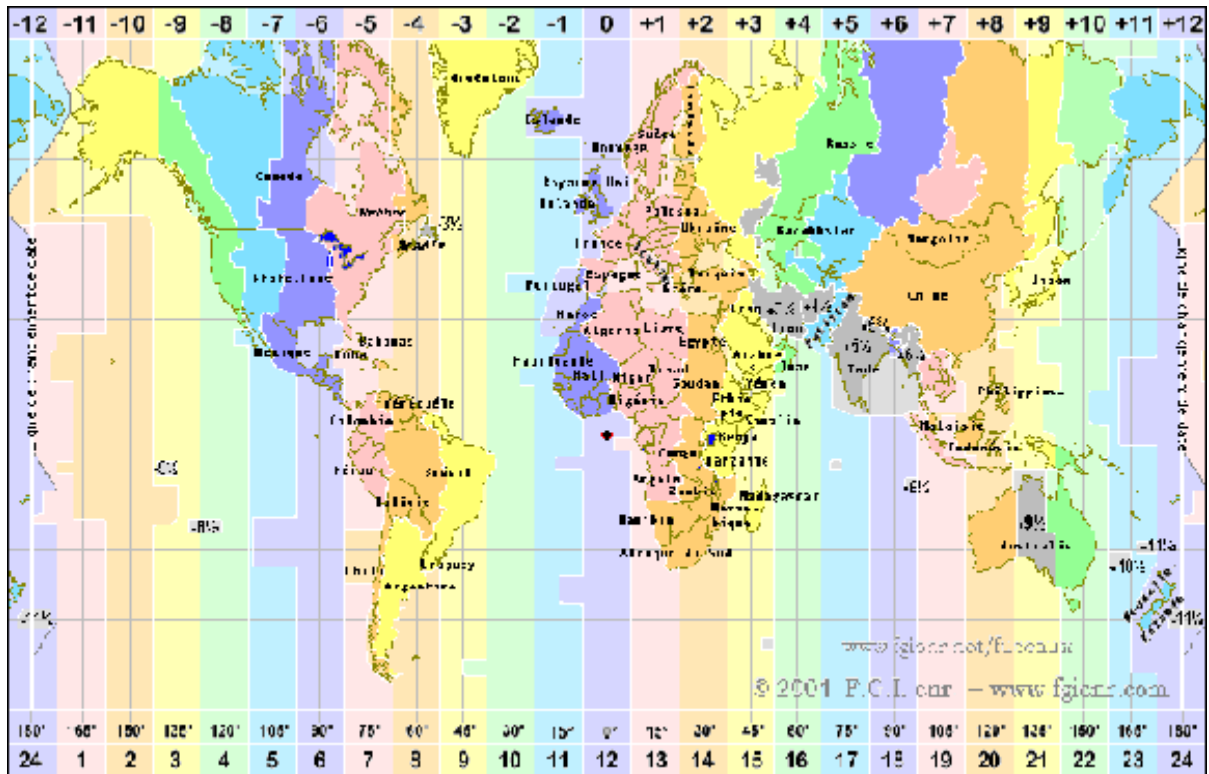


Figure 1.5 : Décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich [9].

- La différence de longitude ($l - l_{ref}$) entre le lieu considéré et le lieu servant de référence au temps légal (en général le centre du fuseau).

Le temps solaire TS se calcule finalement par la formule [9]:

$$TS = TL - C + ET + \frac{(l_{ref} - l)}{15} \quad \dots\dots\dots (1.11)$$

La correction maximale due à l'équation du temps est de l'ordre de 16 mn, on peut ne pas en tenir compte en première approximation. On trouvera les variations annuelles de la déclinaison et de l'équation du temps sur la figure 1.6.

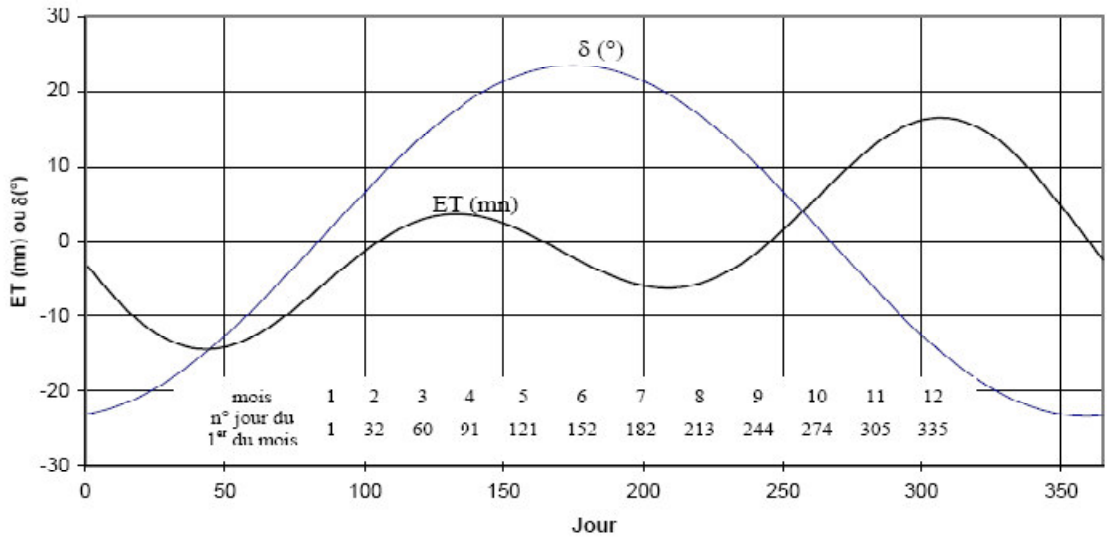


Figure 1.6 : Equation du temps ET et déclinaison δ en fonction du jour de l'année [6].

1.4.4. La durée et le taux d'insolation:

a) Durée d'ensoleillement :

Selon les conditions atmosphériques, le ciel peut être plus ou moins couvert de nuages au cours d'une journée. Ceux-ci occultent le soleil, totalement ou partiellement, empêchant ainsi le rayonnement d'atteindre directement le sol. On dit que la nébulosité est plus ou moins importante selon qu'il y a beaucoup ou peu de nuages.

On appelle durée effective d'ensoleillement ou insolation SS le temps pendant lequel, au cours d'une journée, le rayonnement solaire direct a atteint le sol du lieu considéré. On appelle rayonnement direct le rayonnement qui atteint la surface terrestre sans avoir subi de déviation depuis son émission par le soleil.

b) Taux d'ensoleillement :

Par ciel clair sans nuages, le sol reçoit le rayonnement solaire direct pendant toute la durée du jour, ou plus précisément pendant la durée maximale d'ensoleillement SS_0 . On appelle taux d'ensoleillement ou taux d'insolation le rapport entre la durée effective et la durée maximale d'ensoleillement [6]:

$$\sigma = \frac{SS}{SS_0} \dots\dots\dots (1.12)$$

La durée maximale d'ensoleillement SS_0 pour un site dégagé peut être prise égale à la durée du jour calculée par la formule (1.8).

Pour le site de village rural saharien isolé nommé "*Ilamane*" wilaya de Tamanrasset, les spécifications sont données par les grandeurs météorologiques suivantes :

- ✓ La latitude : 23.12° N
- ✓ La longitude : 5.27° E
- ✓ L'altitude : 1928 m

1.5. Aspects énergétiques :

1.5.1. Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet (0.2 μ m) à l'infrarouge lointain (2.5 μ m). On utilise la notion AM pour Air Mass afin de caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise [11]. Pour tenir compte de la distance traversée par les rayons, il est nécessaire d'introduire une notion de masse d'air (AM) elle correspond à la longueur relative du parcours à travers l'atmosphère terrestre traversée par le rayonnement solaire direct. La masse d'air est exprimée un multiple du trajet parcouru en un point au niveau de la mer, le soleil étant directement à l'aplomb [12].

Au niveau du sol le rayonnement global reçu par une surface plane d'inclinaison quelconque est constitué de trois composantes principales :

- **Le rayonnement direct** est le rayonnement reçu directement du soleil [11].
- **Le rayonnement diffus** est le rayonnement provenant de toute la voûte céleste. Ce rayonnement est dû à l'absorption et à la diffusion d'une partie du rayonnement solaire par l'atmosphère et à sa réflexion par les nuages [11].
- **Le rayonnement solaire réfléchi** est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. Ce rayonnement peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige) [11].

- **Le rayonnement global** est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface [11].

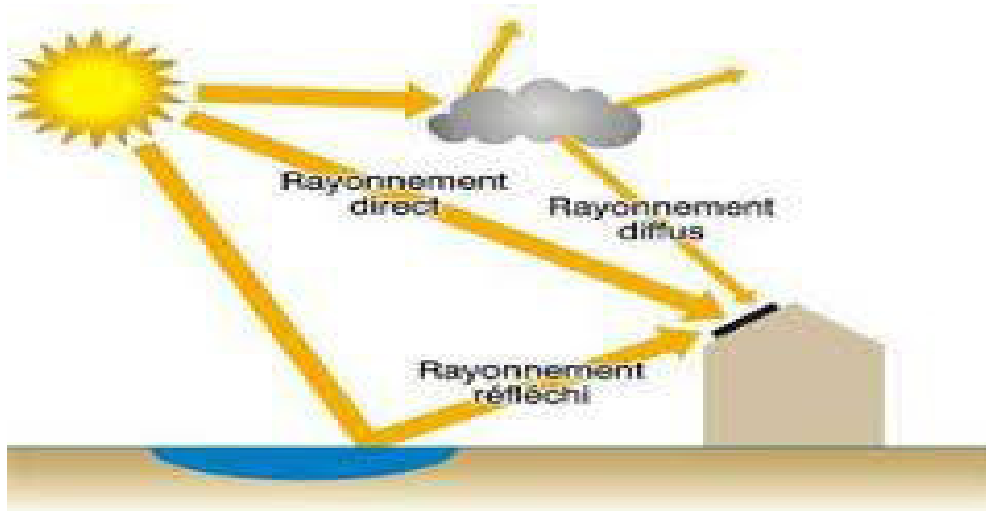


Figure 1.7 : Types de rayonnement solaire reçus au sol [11].

Le tableau 1.1 illustre les notations utilisées pour les composantes du rayonnement solaire sur une surface horizontale.

Irradiation solaire Energie reçue pendant une certaine durée en $W.m^{-2}.durée^{-1}$ ou $kWh.m^{-2}.durée^{-1}$	Directe	B	G = B + D
	Diffuse	D	
	Globale	G	
Eclairement solaire Flux instantané en $W.m^{-2}$	Direct	B*	G* = B* + D*
	Diffus	D*	
	Global	G*	

Tableau 1.1 : Rayonnement solaire sur un plan horizontal

1.5.2. Variations et types du rayonnement :

a) Annuelle :

La valeur de l'irradiation globale annuelle sur un plan horizontal dépend fortement de la latitude.

b) Mensuelle:

La valeur mensuelle moyenne de l'irradiation globale sur un plan horizontal subit également des variations plus ou moins importantes au cours de l'année.

c) Journalière :

L'éclairement solaire reçu par un capteur varie typiquement de la manière représentée sur la figure (1.7) au cours d'une journée non-perturbée : nul la nuit, il augmente dès le lever du jour pour atteindre un maximum au midi solaire avant de décroître de nouveau jusqu'à s'annuler à la tombée de la nuit. [4]

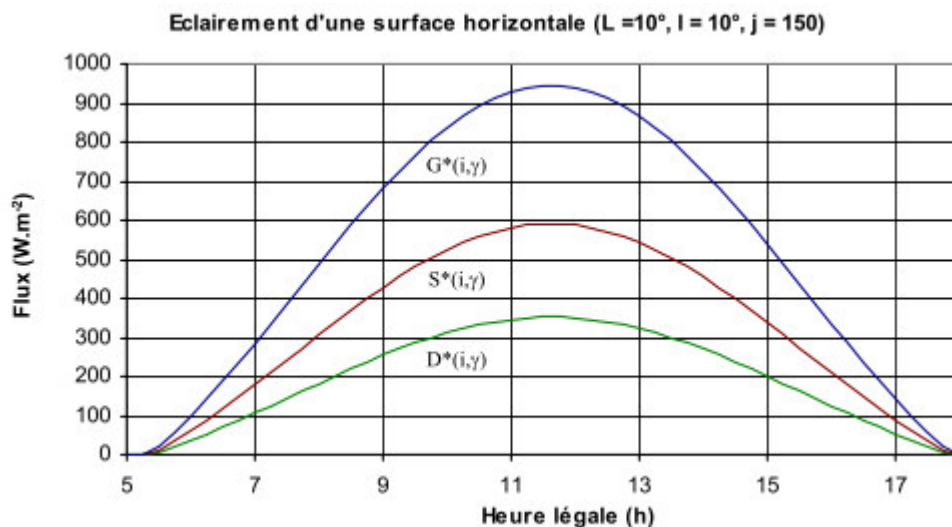


Figure 1.8: Variation type de l'éclairement solaire au cours d'une journée non-perturbée [4].

1.6. Le gisement solaire en Algérie :

Suite à une évaluation par satellites, l'Agence spatiale allemande (ASA) a conclu, que l'Algérie représente le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen: 169000 TWh/an pour le solaire thermique, 14 TWh/an pour le solaire photovoltaïque et 35 TWh/an pour l'éolien [12] La répartition du potentiel solaire par région climatique au niveau du territoire algérien est présentée dans le tableau 1.2, selon l'ensoleillement reçu annuellement.

Régions	Littoral	Hauts-Plateaux	Sahara
Superficie(%)	4	10	86
Ensoleillement (heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Tableau 1.2 : L'ensoleillement reçu annuellement en Algérie par région climatique [13 ,14].

Le potentiel solaire algérien est l'équivalent de 10 grands gisements de gaz naturel qui auraient été découverts à Hassi R'mel. Par cette conjoncture, l'utilisation de l'énergie solaire est donc bien adaptée aux applications d'électrification rurale.

1.9. Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la description de l'irradiation solaire comme source d'énergie pour le dimensionnement des systèmes photovoltaïques sur un site donné. Ce qui exige la prise en considération du caractère variable et imprévisible de l'irradiation solaire. En effet, le fonctionnement des modules photovoltaïques dépend de l'intensité de l'irradiation solaire reçue et la température des modules photovoltaïques.

CHAPITRE 2: Système D'énergie Hybride

2.1. Introduction:

Le prix d'extension du réseau électrique pour les régions isolées et éloignées s'avère prohibitif et excessif ainsi que le surcoût d'approvisionnement en carburant augmente radicalement avec l'isolement. Le recours au système d'énergie hybride fait signe aux systèmes de génération d'énergie électrique par combinaison de plusieurs types de sources. La combinaison des sources d'énergies renouvelables comme le photovoltaïque, l'éolienne, la biomasse et des petites centrales hydrauliques peut constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes diesels destinés généralement pour alimentation électrique des régions isolées. Les systèmes d'énergie hybride sont habituellement élaborés pour répondre aux besoins énergétiques de l'électrification des maisons autonomes ou l'électrification complète de villages isolés ou de petites îles.

Les énergies renouvelables sont économiquement fiables et rentables pour l'intégration dans les systèmes de production d'énergie électrique, cependant, des améliorations dans la conception et le fonctionnement des systèmes hybrides sont toujours nécessaires pour rendre plus compétitives ces filières technologiques et permettre leur progression.

L'insertion des diverses sources d'énergies dans un système hybride doit avoir une conséquence profitable et bénéfique sur la production d'énergie, en terme de coût et disponibilité, aussi bien que le bilan écologique est présumé favorable. Les moyens de production d'énergies renouvelables représentent des capacités de production variables, incertaines et souvent intermittentes et fluctuantes, non corrélées à la demande de charge. L'objectif d'un système hybride est d'assurer la demande de charge et d'optimiser sa production afin de combler l'énergie demandée par la charge durant la période d'intermittence et tout en maintenant la qualité d'énergie fournie[15].

2.2. Définitions systèmes hybrides :

Les systèmes d'énergie hybride associent des sources d'énergie renouvelable et des sources d'énergie classiques [16, 17,18]. Les sources d'énergie renouvelable, comme le photovoltaïque et l'éolienne ne délivrent pas une puissance constante, mais vu leurs complémentarités, leur association permet d'obtenir une production électrique continue. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées [19,20].

Le but d'un système d'énergie hybride est de produire le maximum d'énergie à partir des sources d'énergie renouvelable pour satisfaire la demande de la charge. En plus des sources d'énergie, un système hybride peut aussi incorporer un système de distribution à courant continu, un système de distribution à courant alternatif, un système de stockage, des convertisseurs, des charges et une option de gestion des charges. Les sources d'énergie renouvelable peuvent être connectées au bus continu ou alternatif en fonction de la dimension du système [2].

La puissance délivrée par les systèmes hybrides peut varier de quelques watts pour des applications domestiques jusqu'à quelque mégawatt pour les systèmes utilisés dans l'électrification de petits villages. Ainsi, les systèmes hybrides utilisés pour des applications de très faible puissance (en dessous de 5 kW) alimentent généralement des charges à courant continu. Les systèmes plus grands, ayant une puissance supérieure à 100kW, connectés sur le bus à courant alternatif, sont conçus pour être connectés aux grands réseaux interconnectés [21].

2.2.1. Systèmes photovoltaïques non connectés au réseau :

On distingue deux types de systèmes photovoltaïques non connectés au réseau. Si l'énergie photovoltaïque est l'unique source d'énergie du système, on parlera de système stand-alone (SAPV system : Stand-alone Photovoltaïque system). Si un autre dispositif de production est utilisé en appui de la production photovoltaïque, on parlera de système photovoltaïque hybride. Dans la majeure partie des cas, le mode de production d'appui est constitué d'un ou plusieurs groupes électrogènes diesels.

Les systèmes photovoltaïques non connectés au réseau sont principalement utilisés dans les zones où le réseau électrique est très peu dense en raison du coût de raccordement prohibitif. L'énergie produite est destinée à être consommée sur place. L'électrification des

sites isolés par systèmes photovoltaïques concerne l'habitat (Solair Home System : SHS) mais aussi les relais de télécommunication se trouvant éloignés des réseaux de distribution électrique [22].

2.2.1.1. Systèmes photovoltaïques autonomes (SAPV) :

La seule production électrique de ce type de systèmes est d'origine photovoltaïque. Un schéma d'un système photovoltaïque autonome est représenté figure (2.1). Du fait de la dé-corrélation entre production photovoltaïque et alimentation des charges du consommateur, un système de stockage est utilisé en tampon, celui-ci étant rechargé en cas de surplus de production et déchargé en cas de surconsommation.

En raison de sa maturité technologique et de son faible coût d'investissement, le moyen de stockage universellement répandu pour de telles applications est du type électrochimique Plomb-Acide [23]. Cependant, de nouvelles technologies sont actuellement envisagées comme celles au Lithium.

Les performances de ce type de système sont directement liées à son dimensionnement. Un sous-dimensionnement a notamment pour conséquences un vieillissement prématuré du système de stockage ainsi qu'un accroissement des délestages de consommation et de production alors qu'un surdimensionnement peut conduire à un surcoût économique.

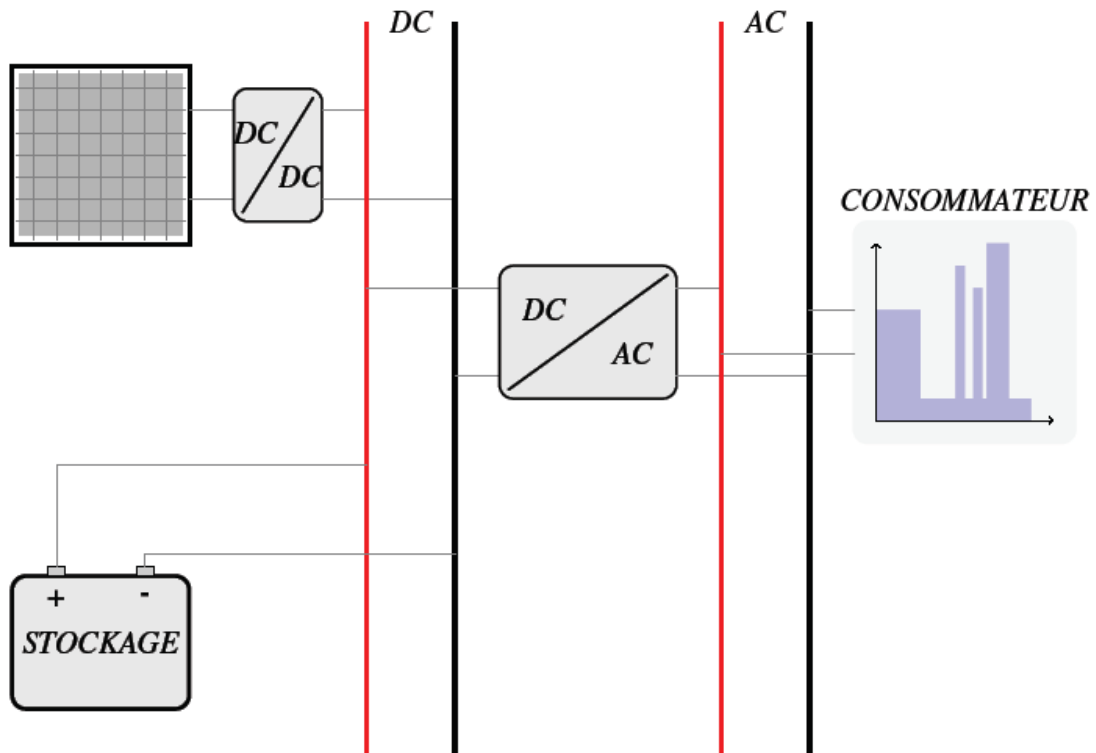


Figure 2.1: Système photovoltaïque autonome [24].

2.2.1.2. Systèmes photovoltaïques autonomes hybrides :

Dans ce type de système, un second producteur d'énergie (le plus souvent un Groupe Électrogène) est utilisé pour pallier les insuffisances de la production photovoltaïque. L'idée étant de faire appel à l'énergie de ce producteur lorsque le système n'est plus en mesure de subvenir aux besoins du consommateur et/ou que l'état de charge de l'accumulateur est trop faible. La figure (2.2) représente une architecture possible d'un système photovoltaïque autonome hybride.

L'avantage de ce type de système est que, théoriquement, le consommateur ne se trouve jamais en situation d'être délesté, le groupe électrogène assurant la fourniture d'énergie lorsque la production PV est insuffisante (sauf dans le cas où le réservoir du groupe électrogène est vide). Les coûts d'investissement des panneaux photovoltaïques et du système de stockage peuvent être minimisés ; par contre, les coûts de fonctionnement principalement liés au prix du combustible du groupe électrogène sont plus importants que

pour un système autonome non hybride [24].

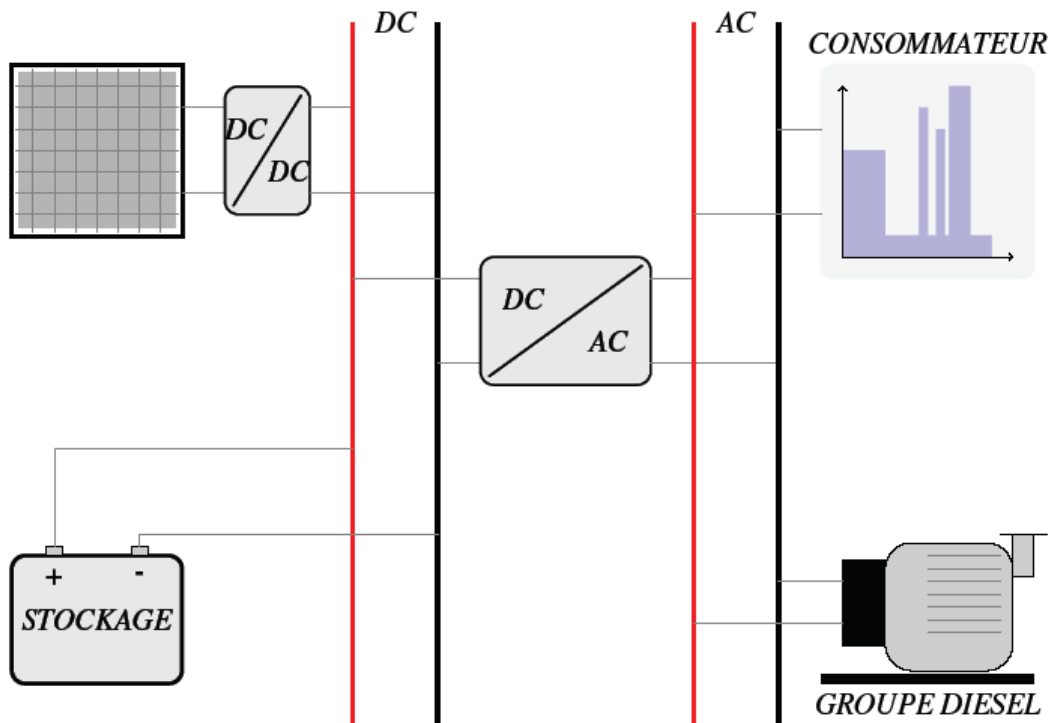


Figure 2.2: Exemple d'architecture électrique d'un système photovoltaïque autonome hybride [24].

2.2.2. Caractérisation et tache des systèmes hybrides :

Le système hybride de production d'énergie est un système qui combine et exploite différentes sources d'énergies disponibles et facilement mobilisables. Les systèmes hybrides sont souvent autonome vis à vis des grands réseaux interconnectés et fréquemment utilisés dans les régions isolées. Ces systèmes seront conçus dans l'intention d'économiser le carburant et la baisse de prix obtenue par la génération hybride doit au moins couvrir l'investissement envisagé d'énergie renouvelable et les autres composants auxiliaires du système [15].

2.3. Configuration parallèle ou multi master :

Dans la configuration parallèle, toutes les sources peuvent alimenter la charge séparément à faible et moyenne demande mais également suppléer les pointes en combinant les sources. L'onduleur bidirectionnel peut fonctionner, soit comme un redresseur lorsqu'il y a un excès

d'énergie produite par le diesel pour charger la batterie, soit comme un onduleur, pour transférer l'énergie fournie par le champ photovoltaïque ou par la batterie vers la charge. Grâce à l'onduleur bidirectionnel, le système parallèle peut alimenter une charge supérieure à la puissance nominale du générateur. Ce système possède deux améliorations par rapport aux configurations série et commutée. L'association du générateur diesel et de l'onduleur permet l'alimentation d'une charge supérieure à la charge alimentée par chaque élément seul. En principe, la capacité du système est deux fois plus grande dans cette configuration. La possibilité de synchroniser l'onduleur avec le générateur diesel permet une meilleure flexibilité du système et de plus, la puissance nominale du générateur diesel peut être diminuée, ce qui augmente la partie de l'énergie directement utilisée d'où on obtient une augmentation du rendement du système. En utilisant un seul convertisseur comme onduleur et redresseur, on diminue le nombre des éléments dans le système. De plus, les coûts du câblage et l'installation du système peuvent être diminués par l'intégration de toutes les composantes dans une seule unité, ce qui est avantageux, mais peut empêcher l'augmentation de la taille du système par l'ajout de nouveaux composants si la demande en électricité augmente [25].

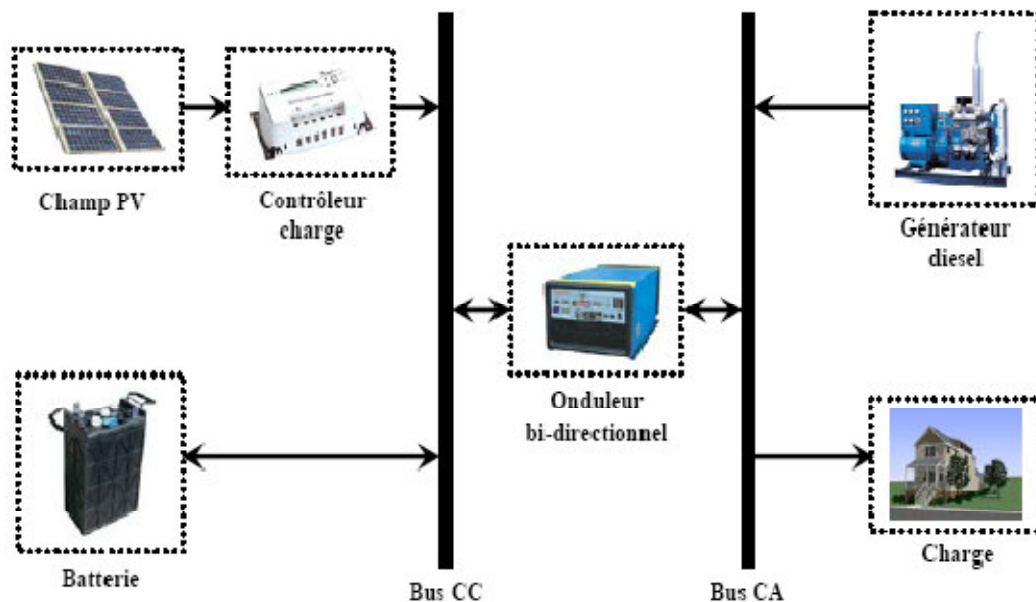


Figure 2.3: Configuration PV/Diesel parallèle [25].

Dans la configuration hybride PV/Diesel parallèle on distingue généralement deux architectures figure (2.4) à savoir [26] :

- L'architecture « Multi-master » avec générateurs Diesels ;
- L'architecture « Multi-master » avec onduleurs.

L'architecture « **Multi-master** » avec **générateurs Diesels** est une architecture typique pour les grands systèmes avec plusieurs générateurs Diesel en parallèle couplés au générateur photovoltaïque via un onduleur.

L'architecture « **Multi-master** » avec **onduleurs** est constitué de plusieurs onduleurs couplés à un générateur Diesel. Ici l'augmentation du champ photovoltaïque est aisée car elle ne nécessite pas un arrêt total du système. Dans les deux architectures, un système de contrôle central peut être installé afin d'optimiser l'opération des générateurs diesel, (niveau de puissance, synchronisation, démarrage, arrêt).

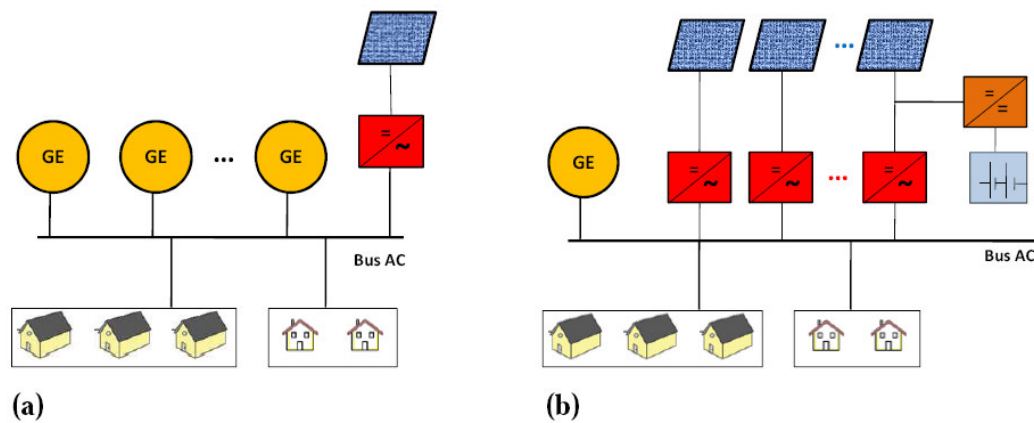


Figure 2.4: Différentes architectures de la configuration PV/Diesel parallèle [26].

- (a) architecture « Multi master avec générateurs Diesel,
- (b) architecture « multi-master » avec onduleurs.

Il faut cependant souligner que la configuration multi master peut se faire avec plusieurs générateurs Diesels et plusieurs onduleurs.

2.4. Modélisation des composants :

2.4.1. Modélisation du générateur photovoltaïque :

- Modèle de la diode :

Un générateur photovoltaïque est constitué d'une association de modules photovoltaïques en série et en parallèle. L'élément responsable de la conversion photovoltaïque dans un module ou un générateur photovoltaïque est la cellule photovoltaïque. Ainsi, La modélisation du comportement électrique d'une cellule photovoltaïque peut être étendue au module photovoltaïque.

Le schéma équivalent d'un module PV est représenté par la figure (2.5). A l'aide de la loi des nœuds, la caractéristique $I = f(V)$ d'un module photovoltaïque est donnée en fonction du photo courant I_L , la résistance série R_s et la résistance shunt R_{sh} . L'équation mathématique est comme suit [27,28] :

$$I = I_L - I_0 \left[\exp \left(\frac{V + I.R_s}{A.V_t} \right) - 1 \right] - \frac{V + I.R_s}{R_{sh}} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

$$\text{Où : } V_t = \frac{KT_j}{q} \quad \dots\dots\dots (2.2)$$

Avec :

I_0 : courant de saturation.

q : charge de l'électron.

K : constante de Boltzmann.

A : facteur d'idéalité relative au module.

T_j : température de la jonction.

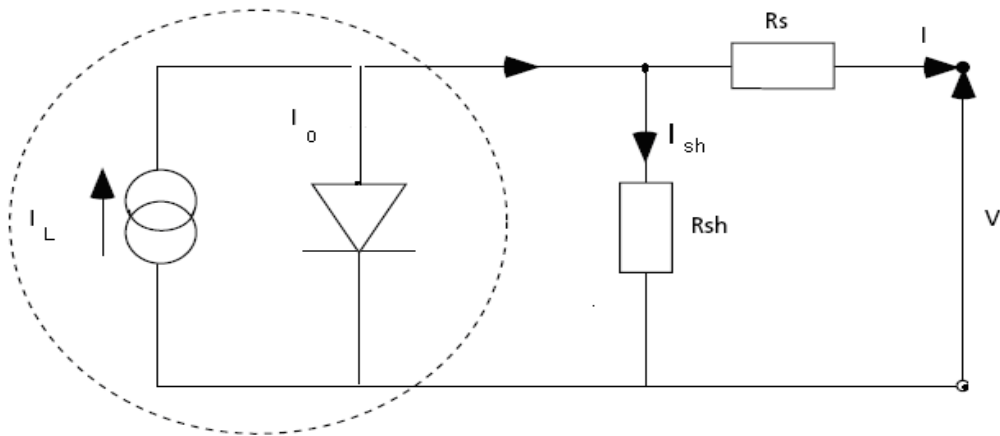


Figure 2.5: Schéma équivalent d'un module photovoltaïque [6].

La courbe caractéristique $I = f(V)$ d'un module photovoltaïque représente la variation du courant en fonction de la tension à ces bornes. Cette courbe est établie dans des conditions ambiantes de fonctionnement. Cette caractéristique $I = f(V)$ est influencée par l'intensité de l'éclairement solaire et la température du module photovoltaïque.

La figure (2.6) montre que le courant est proportionnel à l'intensité de l'éclairement solaire. Par contre la tension du circuit ouvert est inversement proportionnelle à la température de jonction figure (2.7).

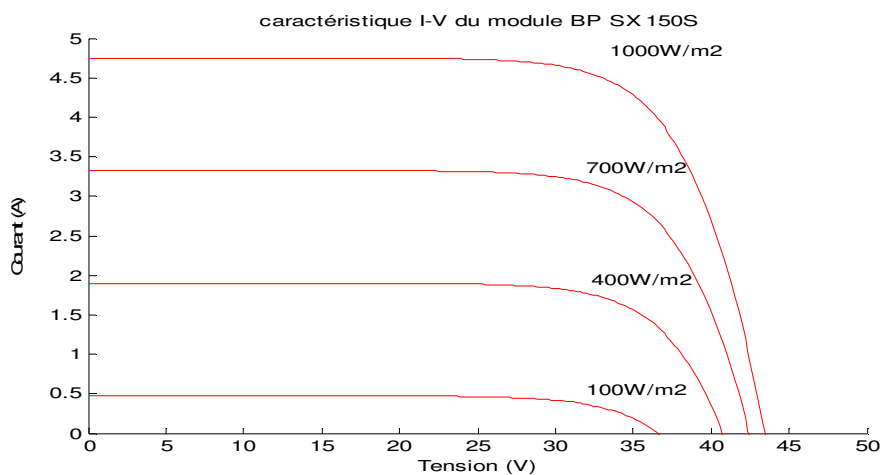


Figure 2.6: Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique

$I = f(V)$ pour une température constante [6].

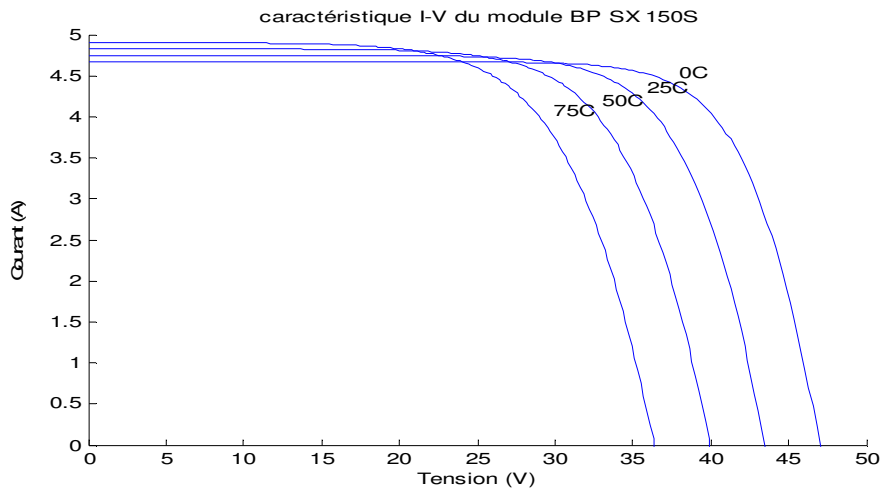


Figure 2.7: Influence de la température sur la caractéristique $I = f(V)$

Pour un éclairement solaire constant [6].

La fonction caractéristique $I = f(V)$ est implicite et non linéaire. Alors le calcul d'une solution est une tâche très délicate qui nécessite des méthodes itératives.

2.1.2. Modélisation du système de stockage :

- Modèle de Copetti de batterie au plomb :

Ce modèle est basé sur le schéma électrique de la figure 2.8 La batterie est alors décrite par seulement deux éléments dont les caractéristiques dépendent d'un certain nombre de paramètres: une source de tension et sa résistance interne [30].

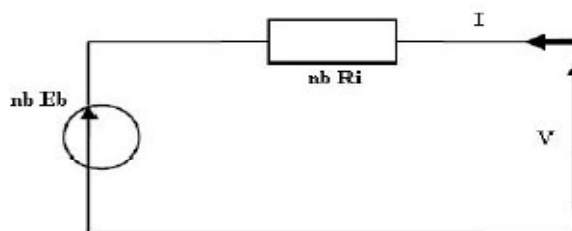


Figure 2.8: Schéma électrique équivalent de nb éléments de batteries en série [31].

Pour nb éléments en série, nous pouvons écrire l'équation :

$$V = n_b E_b + n_b R_i I \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

Le modèle proposé par Copetti est applicable pour les batteries au plomb et plus particulièrement aux batteries solaires. Il décrit le comportement dynamique de la batterie dans le régime de décharge, de charge et de surcharge.

Nous pouvons résumer ces phénomènes en général, pour les systèmes de stockage sous forme de tableau de description de fonctionnement des batteries.

Tension de batterie	Zone de fonctionnement		Conditions de fonctionnement	
V_{soc}	Saturation	$I > 0$	$V = V_{ec} \quad \eta_c = 0$	
	Gazage		$V_{ec} \geq V \geq V_g$	$0 < \eta_c < 1$
V_c	Charge		$V < V_g$	
	Transition charge/décharge	$I = 0$	$V_c \geq V \geq V_d$	
V_d	Décharge	$I < 0$	$V > 0.9V_N$	
	Sur décharge		$V_N \geq V \geq 0.7V_N$	
	Décharge profonde		$V < 0.7V_N$	

Tableau 2.1 : Description de la zone de fonctionnement des batteries [32].

2.4.3. Modélisation de la consommation en fuel du groupe électrogène :

Dans les gammes des petites et moyennes puissances, il existe différents types d'entraînement pour les groupes électrogènes ; pour les faibles puissances on utilise les moteurs à essence et les moteurs diesel pour les puissances supérieures à 2 kW. Etant donné la gamme de puissance considérée, nous utiliserons des moteurs diesel dont la vitesse de rotation est soit de 3000 tr/min (utilisation pour de courtes périodes sur la journée), soit de 1500 tr/min (utilisation en continue sur la journée) [33].

Nous utilisons ici un modèle développé au Centre de Recherches «Energie et Systèmes » (URACNRS- 2053) de l'Université de Corse qui a réalisé des études expérimentales sur les

groupes électrogènes de petites puissances [34]. Un groupe électrogène est défini par son rendement η_{GE} et par sa consommation (en litre/h) à une puissance de fonctionnement P_{GE} .

Le rendement :

$$\eta_{GE} = \frac{P_{GE}}{PCI_v \cdot Q_{GE}} \dots\dots\dots (2.14)$$

La consommation :

$$Q_v = Q_v^0 \left(\lambda + \xi \frac{P_{GE}}{P_{GE}^0} \right) \dots\dots\dots (2.15)$$

Avec :

$$\xi = \frac{P_{GE}^0}{\eta_{GE} \cdot PCI_v \cdot Q_v^0} \dots\dots\dots (2.16)$$

Où :

P_{GE}^0 : puissance nominale du groupe.

Q_v^0 : consommation à cette puissance nominale.

PCI_v : énergie contenue dans un litre de combustible.

Q_v^0/P_{GE}^0 : consommation spécifique du groupe.

En prenant comme valeur pour les groupes électrogènes diesel :

$$PCI_v = 10.08 \text{ KWh/l} ; Q_v^0/P_{GE}^0 = 0.3 \text{ l/KWh}$$

Et on obtient ainsi le modèle de la consommation d'un groupe électrogène par :

$$Q_v = 0.3 \cdot P_{GE}^0 \cdot \left(0.22 + 0.78 \frac{P_{GE}}{P_{GE}^0} \right) \dots\dots\dots (2.17)$$

2.5. Dimensionnement du système :

L'étude de dimensionnement est toujours confrontée à deux critères essentiels qui sont le gisement solaire et la demande de l'énergie. Le dimensionnement d'une installation solaire photovoltaïque revient à déterminer le nombre nécessaire des modules photovoltaïques constituant le générateur photovoltaïque, pour adopter un système PV suffisant pour couvrir les besoins de la charge à tout instant, et de déterminer la capacité de charge de la batterie. Ces deux éléments sont les plus importants en raison du coût élevé qu'ils totalisent, plus de deux tiers du coût de l'installation. La méthode de dimensionnement optimal LPSP (*Loss of Power Supply probability*) ou probabilité de perte d'énergie est la plus utilisée pour l'optimisation de la puissance crête du générateur photovoltaïque et la capacité du stockage en fonction de l'éclairement solaire du site et le nombre de jours d'autonomie souhaité.

2.5.1. Description de la méthode LPSP :

La probabilité de perte d'énergie (loss of power supply probability LPSP) est une technique probabiliste introduite par AbouZahr et Ramakumar en 1990 dans le domaine des systèmes de génération éoliens et photovoltaïques [35,36]. Elle est largement utilisée dans la conception et l'optimisation de systèmes autonomes (stand-alone) éolien-photovoltaïques jusqu'à présent [37,38,39]. Elle est basée sur le concept de LPSP qui est la probabilité que le système rencontre une pénurie à un moment donné pendant une période d'analyse, c'est-à-dire un état dans lequel le système ne serait pas en mesure de fournir l'énergie nécessaire à la charge. A partir de l'information sur la variabilité des ressources et sur sa corrélation avec la charge, la LPSP peut être calculée. Cette méthode est particulièrement utile lors de l'évaluation du comportement d'un stockage d'énergie.

La LPSP exprime le taux de non-satisfaction de la charge. En terme d'état de charge des batteries, la 'LPSP' est définie par [40,41] :

$$LPSP = P_r \{ E_B(t) \leq E_{Bmin} \xrightarrow{\text{pour}} t \leq T \} \quad \dots\dots\dots (2.18)$$

C'est-à-dire, la probabilité pour que l'état de charge, à tout instant t, soit inférieur ou égal au seuil minimal de l'énergie disponible dans la batterie E_{Bmin} . $E_B(t)$ est l'énergie stockée dans la batterie à n'importe quel instant t, exprimée en [Wh].

$$C_{bat} [Wh] = C_{bat} [Ah] \cdot V_{bat} \quad \dots\dots\dots (2.19)$$

V_{bat} : La tension nominale de la batterie.

C_{bat} : La capacité nominale de la batterie en (Ah).

La capacité des batteries pour une période de temps Δt par jour est donnée par l'équation suivante :

$$C_{bat} = \frac{E_L \cdot \Delta t}{\eta_{bat} \cdot f_d \cdot DOD \cdot V_{bat}} [Ah] \quad \dots\dots\dots (2.20)$$

La période Δt fournie par le concepteur, par rapport à l'autonomie demandée.

E_L : énergie de load.

η_{bat} : Rendement de la batterie.

f_d : Facteur de décharge de la batterie.

DOD : Profondeur de décharge.

2.5.2. Modèle de simulation :

L'énergie produite par le générateur photovoltaïque en une heure, notée $E_G(t)$, peut être exprimée par la relation suivante [42] :

$$E_G(t) = N_{PV} E_{PV}(t) \quad \dots\dots\dots (2.21)$$

Avec $E_{PV}(t)$, l'énergie produite par le module photovoltaïque et N_{PV} le nombre de modules photovoltaïques. Deux scénarios sont envisagés pour décrire l'énergie stockée dans les

batteries.

▪ **Premier scénario :**

Si l'énergie produite par le générateur photovoltaïque dépasse l'énergie demandée par la charge, en considérant son rendement de charge $\eta_{B, ch}$, la batterie se charge suivant la relation :

$$E_B(t) = E_B(t-1) + \left(E_G(t) - \frac{E_L(t)}{\eta_{ond}} \right) \eta_{B, ch} \dots\dots\dots (2.22)$$

avec: η_{ond} le rendement de l'onduleur; $\eta_{B, ch}$ le rendement de charge de la batterie, $E_B(t)$ l'énergie stockée dans la batterie à une heure t, $E_B(t-1)$ l'énergie stockée dans la batterie à l'heure précédente, $E_L(t)$ l'énergie demandée par la charge à une heure t.

▪ **Deuxième scénario :**

Quand l'énergie demandée par la charge est supérieure à l'énergie produite par le générateur photovoltaïque, la batterie se décharge pour combler le déficit, dans ce cas précis, l'énergie stockée dans la batterie peut être exprimée par la relation suivante:

$$E_B(t) = E_B(t-1) + \left(E_G(t) - \frac{E_L(t)}{\eta_{ond}} \right) \dots\dots\dots (2.23)$$

Quand l'énergie stockée dans le banc de batteries et celle produite conjointement par les deux sources est insuffisante pour satisfaire la demande pour une heure t, ce déficit est appelé perte d'énergie (Loss of Power Supply _ 'LPS'), il est exprimé par:

$$LPS(t) = E_L - (E_G(t) + E_B(t-1) - E_{B, min}) \eta_{ond} \dots\dots\dots (2.24)$$

La probabilité de perte d'énergie 'LPS' pour une période d'analyse T, est le rapport de la somme de toutes les valeurs de perte d'énergie LPS(t) pour la même période sur l'énergie totale demandée. La probabilité de perte d'énergie 'LPS' est définie par la relation suivante [41,42, 43] :

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^T LPS(t)}{\sum_{t=1}^T E_L(t)} \dots\dots\dots (2.25)$$

Comme la plupart des gaz d'échappement du générateur diesel est le CO₂, dans cette étude le nombre de kg de CO₂ produite par le générateur diesel est considéré comme représentant l'émission de polluants. Pour chaque période de temps au cours d'une année, les émissions de CO₂ calculé en utilisant l'équation. [44,45].

$$CO_2 = \sum_{t=1}^T fuel * EF \dots\dots\dots (2.26)$$

Avec EF facteur d'émission, on prend EF=2.5

2.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté la configuration du système hybride, avec les avantages et les inconvénients de cette configuration ensuite nous avons décrit et modélisé chaque composant dans cette installation utilisés.

Nous avons ensuite mis en évidence la méthode de dimensionnement (LPSP) choisi pour notre travail, et donné la démarche à suivre pour accomplir ces différentes étapes.

Chapitre 3 : Optimisation par essaim particulaire

3.1. Introduction :

L'optimisation par essaim de particules (Particle Swarm Optimization (PSO) est une méthode d'optimisation stochastique, pour les fonctions non-linéaires, basée sur la reproduction d'un comportement social et développée par le Dr. EBERHART et le Dr.KENNEDY [46, 47] en 1995.

L'origine de cette méthode vient des observations faites lors des simulations informatiques de vols groupés d'oiseaux et de bancs de poissons de REYNOLD [48], HEPPNER et GRENANDER [49]. Ces simulations ont mis en valeur la capacité des individus d'un groupe en mouvement à conserver une distance optimale entre eux et à suivre un mouvement global par rapport aux mouvements locaux de leur voisinage.

D'autre part, ces simulations ont également révélé l'importance du mimétisme dans la compétition qui oppose les individus à la recherche de la nourriture. En effet, les individus sont à la recherche de sources de nourriture qui sont dispersés de façon aléatoire dans un espace de recherche, et dès lors qu'un individu localise une source de nourriture, les autres individus vont alors chercher à le reproduire.

Ce comportement social basé sur l'analyse de l'environnement et du voisinage constitue alors une méthode de recherche d'optimum par l'observation des tendances des individus voisins. Chaque individu cherche à optimiser ses chances en suivant une tendance qu'il modère par ses propres vécu.

3.2. Méta-heuristiques pour l'optimisation mono-objectif difficile :

3.2.1 .Problème d'optimisation :

Un problème d'optimisation au sens général est défini par un ensemble de variables, une fonction objectif f et un ensemble de contraintes d'égalité (ou d'inégalité) que les variables doivent satisfaire. L'ensemble des solutions possibles du problème forme l'espace de recherche E , où chaque dimension correspond à une variable. L'espace de recherche E est fini puisque le décideur précise exactement le domaine de définition de chaque variable entre autres pour des raisons de temps de calcul. Suivant le problème posé, nous cherchons à minimiser ou maximiser la fonction objectif f . Un problème d'optimisation peut être statique ou dynamique (i.e. la fonction objectif change avec le temps), mono objectif ou multi-objectif (i.e. plusieurs fonctions objectifs doivent être optimisées) et avec ou sans contraintes. Ainsi, un problème d'optimisation peut être, par exemple, à la fois continu et dynamique.

Il existe de nombreuses méthodes déterministes (ou exactes) permettant de résoudre certains types de problèmes d'optimisation et d'obtenir la solution optimale du problème, en un temps raisonnable. Ces méthodes nécessitent que la fonction objectif présente un certain nombre de caractéristiques telles que la convexité, la continuité ou la dérivabilité.

3.2.2. Optimisation difficile :

Les méthodes de résolution exacte ne sont pas adaptées à toutes les problématiques et donc certains problèmes sont trop complexes à résoudre par ces méthodes. Parmi ces problématiques, nous pouvons citer l'existence de discontinuités, l'absence de convexité stricte, la non-dérivabilité, la présence de bruit ou encore la fonction objectif peut ne pas être définie précisément (ex. quand c'est un coût). En outre, les méthodes de résolution exacte peuvent avoir un temps de résolution trop long. Dans ce cas, le problème d'optimisation est dit difficile, car aucune méthode exacte n'est capable de le résoudre en un temps raisonnable. Il est alors nécessaire d'avoir recours à des heuristiques de résolution dites méthodes approchées, qui fournissent un résultat sans garantie de l'optimalité.

L'optimisation difficile peut se diviser en deux types de problèmes : les problèmes à variables discrètes et les problèmes à variables continues :

– Un problème d'optimisation à variables discrètes consiste à trouver, dans un ensemble discret, une solution réalisable. 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 discrètes rassemblent les problèmes de type NP-complets, tels que le problème du voyageur de commerce. L'utilisation d'algorithmes d'optimisation stochastiques, tels que les méta-heuristiques, permettant de trouver une solution approchée en un temps raisonnable est donc courante.

– Dans le deuxième type, les variables du problème d'optimisation sont continues.

C'est le cas par exemple des problèmes d'identification, où l'on cherche à minimiser l'erreur entre le modèle d'un système et des observations expérimentales. Ce type de problèmes est moins formalisé que le précédent, mais un certain nombre de difficultés sont bien connues, comme l'existence de nombreuses variables présentant des corrélations non identifiées, la présence de bruit ou plus généralement une fonction objectif accessible par simulation uniquement. En effet, la grande majorité des méta-heuristiques existantes ont été créées pour résoudre des problèmes à variables discrètes [50]. Cependant, la nécessité croissante de méthodes pouvant résoudre ce type de problèmes a poussé les chercheurs à adapter leurs méthodes au cas continu.

Il est à noter qu'il existe des problèmes à variables mixtes (i.e. le problème présent à la fois des variables discrètes et continues).

3.2.3. Algorithmes d'optimisation approchée :

3.2.3.1. Heuristiques :

L'utilisation de méthodes exactes n'est pas toujours possible pour un problème donné à cause d'un certain nombre de contraintes, telles que le temps de calcul souvent important ou bien la difficulté, voire l'impossibilité dans certains cas, d'une définition séparée du problème.

Pour faire face à ces contraintes, nous utilisons des méthodes approchées, appelées

Heuristiques. Le terme heuristique dérive du grec ancien *heuriskêin* et signifie « trouver ». Il qualifie tout ce qui sert à la découverte et à l'exploitation. Il est à souligner ici qu'une méthode heuristique peut être déterministe ou stochastique.

Une heuristique est un algorithme qui fournit rapidement (en un temps polynomial) une solution approchée et réalisable, pas nécessairement optimale, pour un problème d'optimisation difficile. Cette méthode approximative est le contraire d'un algorithme exact qui donne une solution optimale pour un problème donné.

Il y a une multitude d'heuristiques qui ont déjà été proposées dans la littérature. Nous pouvons citer des heuristiques très simples telles que les algorithmes gloutons [51,52] ou les approches par amélioration itérative [53]. Le principe des méthodes gloutonnes est de faire une succession de choix optimaux localement, jusqu'à ce que l'on ne puisse plus améliorer la solution, et ce, sans retour en arrière possible. Le fonctionnement d'une heuristique gloutonne est similaire à celui d'un algorithme glouton exact. La différence réside dans le fait que nous n'imposons plus que la solution obtenue soit optimale, nous obtenons donc un algorithme d'approximation.

3.2.3.2. Méta-heuristiques :

Des heuristiques plus poussées, adaptables à un grand nombre de problèmes différents, sans changements majeurs dans l'algorithme, ont été mises au point et ont donné naissance à une nouvelle famille d'algorithmes d'optimisation stochastiques : les méta-heuristiques. Le terme méta-heuristique a été inventé par Fred Glover en 1986, lors de la conception de la recherche tabou [54].

Les méta-heuristiques forment une famille d'algorithmes d'optimisation visant à résoudre des problèmes d'optimisation difficile, pour lesquels nous ne connaissons pas de méthodes classiques plus efficaces. Elles sont généralement utilisées comme des méthodes génériques pouvant optimiser une large gamme de problèmes différents, d'où le qualificatif méta. Leur capacité à optimiser un problème à partir d'un nombre minimal d'informations est contrebalancée par le fait qu'elles n'offrent aucune garantie quant à l'optimalité de la meilleure solution trouvée. Cependant, du point de vue de la recherche opérationnelle, ce constat n'est pas forcément un des inconvénients, puisque l'on préfère toujours une approximation de l'optimum global trouvée rapidement à une valeur exacte trouvée dans un temps rédhibitoire.

Il existe un grand nombre de méta-heuristiques différentes, allant de la simple recherche locale à des algorithmes complexes de recherche globale. La plupart 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. Les méta-heuristiques peuvent être considérées comme des algorithmes stochastiques itératifs, où elles manipulent une ou plusieurs solutions à la recherche de l'optimum. Les itérations successives doivent permettre de passer d'une solution de mauvaise qualité à la solution optimale. L'algorithme s'arrête après avoir atteint un critère d'arrêt, consistant généralement en l'atteinte du temps d'exécution imparti ou en une précision demandée. Ces méthodes tirent leur intérêt de leur capacité à éviter les optima locaux, soit en acceptant des dégradations de la fonction objectif au cours du traitement, soit en utilisant une population de points comme méthode de recherche.

Les méta-heuristiques sont souvent inspirées de processus naturels qui relèvent de la physique (l'algorithme du recuit simulé), de la biologie de l'évolution (les algorithmes génétiques) ou encore de l'éthologie (les algorithmes de colonies de fourmis ou l'optimisation par essaim particulaire).

Les méta-heuristiques se caractérisant par leur capacité à résoudre des problèmes très divers, elles se prêtent naturellement à des extensions. Pour illustrer celles-ci, nous pouvons citer :

- Les méta-heuristiques pour l'optimisation multi objectif [55] : où il faut optimiser plusieurs objectifs contradictoires. Le but ne consiste pas ici à trouver un optimum global, mais à trouver un ensemble d'optima, qui forment une surface de compromis pour les différents objectifs du problème ;
- Les méta-heuristiques pour l'optimisation multimodale [56] : où l'on ne cherche plus l'optimum global, mais l'ensemble des meilleurs optima globaux et/ou locaux ;
- Les méta-heuristiques pour l'optimisation de problèmes bruités : où il existe une incertitude sur le calcul de la fonction objectif, dont il faut tenir compte dans la recherche de l'optimum ;
- Les méta-heuristiques pour l'optimisation dynamique [57] : où la fonction objectif varie dans le temps, ce qui nécessite d'approcher l'optimum à chaque pas de temps ;
- Les méta-heuristiques hybrides [58] : qui consistent à combiner différentes méta-heuristiques , afin de tirer profit des avantages respectifs ;

– Les méta-heuristiques parallèles [59] : où l'on cherche à accélérer le calcul, en répartissant la charge de calcul sur des unités fonctionnant de concert. Le problème revient alors à adapter les méta-heuristiques pour qu'elles soient distribuées.

En général, l'utilisateur demande des méthodes efficaces et rapides permettant d'atteindre un optimum avec une précision acceptable dans un temps raisonnable, mais il a besoin aussi des méthodes simples à utiliser. Un des enjeux des méta-heuristiques est donc de faciliter le choix d'une méthode et de simplifier son réglage pour l'adapter au mieux à un problème posé.

3.3. Optimisation par Essaim Particulaire :

3.3.1. Principe général :

L'optimisation par essaim particulaire (OEP), ou Particle Swarm Optimization (PSO) en anglais, est un algorithme évolutionnaire qui utilise une population de solutions candidates pour développer une solution optimale au problème. Cet algorithme a été proposé par Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et James Kennedy (socio-psychologue) en 1995 [60]. Il s'inspire à l'origine du monde du vivant, plus précisément du comportement social des animaux évoluant en essaim, tels que les bancs de poissons et les vols d'oiseaux. En effet, on peut observer chez ces animaux des dynamiques de déplacement relativement complexes, alors qu'individuellement chaque individu a une « intelligence » limitée, et ne dispose que d'une connaissance locale de sa situation dans l'essaim.

L'information locale et la mémoire de chaque individu sont utilisées pour décider de son déplacement. Des règles simples, telles que « rester proche des autres individus », « aller dans une même direction » ou « aller à la même vitesse », suffisent pour maintenir la cohésion de l'essaim, et permettent la mise en œuvre de comportements collectifs complexes et adaptatifs. L'essaim de particules correspond à une population d'agents simples, appelés particules. Chaque particule est considérée comme une solution du problème, où elle possède une position (le vecteur solution) et une vitesse. De plus, chaque particule possède une mémoire lui permettant de se souvenir de sa meilleure performance (en position et en valeur) et de la meilleure performance atteinte par les particules «

voisines » (informatrices). Chaque particule dispose en effet d'un groupe d'informatrices, historiquement appelé son voisinage.

Un essaim de particules, qui sont des solutions potentielles au problème d'optimisation, « survole » l'espace de recherche, à la recherche de l'optimum global. Le déplacement d'une particule est influencé par les trois composantes suivantes :

1. Une composante d'inertie : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement ;
2. Une composante cognitive : la particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée ;
3. Une composante sociale : la particule tend à se fier à l'expérience de ses congénères et, ainsi, à se diriger vers le meilleur site déjà atteint par ses voisins.

La stratégie de déplacement d'une particule est illustrée dans la figure (3.1).

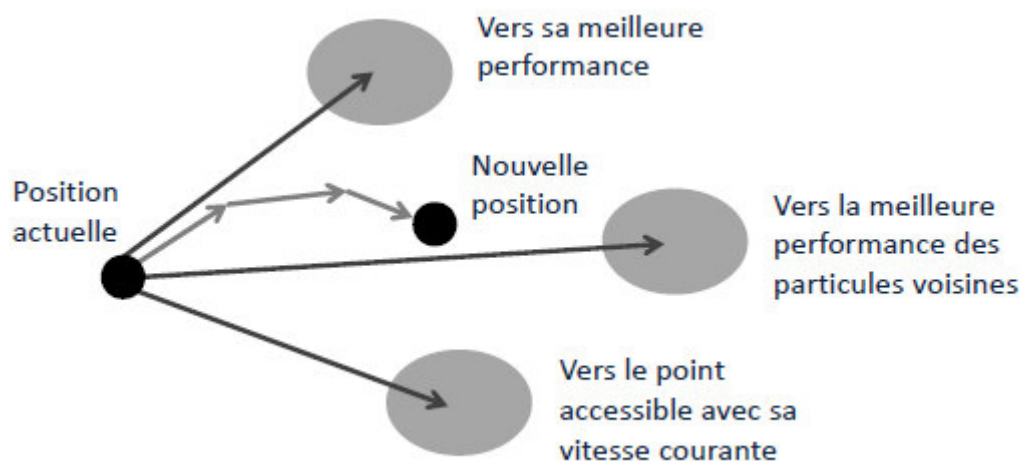


Figure 3.1: Déplacement d'une particule [73,74].

3.3.2. Formalisation :

La particule i de l'essaim est modélisée par son vecteur position $\vec{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ et par son vecteur vitesse $\vec{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$. La qualité de sa position est déterminée par la valeur de la fonction objectif en ce point. Cette particule garde en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà passée, que l'on note $\vec{P}_{besti} = (p_{besti1}, p_{besti2}, \dots$

, $pbest_{iD}$). La meilleure position atteinte par les particules de l'essaim est notée $\vec{G}best = (gbest_1, gbest_2, \dots, gbest_D)$.

Nous nous référons à la version globale de PSO, où toutes les particules de l'essaim sont considérées comme voisines de la particule i , d'où la notation $\vec{G}best$ (global best).

Au départ de l'algorithme, les particules de l'essaim sont initialisées de manière aléatoire/régulière dans l'espace de recherche du problème. Ensuite, à chaque itération, chaque particule se déplace, en combinant linéairement les trois composantes citées ci dessus.

En effet, à l'itération $t + 1$, le vecteur vitesse et le vecteur position sont calculés à partir de l'équation (3.1) et de l'équation (3.2), respectivement.

$$v_{i,j}^{t+1} = wv_{i,j}^t + c_1r_{1i,j}^t[pbest_{i,j}^t - x_{i,j}^t] + c_2r_{2i,j}^t[gbest_{i,j}^t - x_{i,j}^t] \quad , j \in \{1,2,\dots,D\} \quad \dots\dots\dots (3.1)$$

$$x_{i,j}^{t+1} = x_{i,j}^t + v_{i,j}^{t+1} \quad , j \in \{1,2,\dots,D\} \quad \dots\dots\dots(3.2)$$

Où w est une constante, appelée coefficient d'inertie ; c_1 et c_2 sont deux constantes, appelées coefficients d'accélération ; r_1 et r_2 sont deux nombres aléatoires tirés uniformément dans $[0, 1]$, à chaque itération t et pour chaque dimension j .

Les trois composantes mentionnées ci-dessus (i.e. d'inertie, cognitive et sociale) sont représentées dans l'équation (3.1) par les termes suivants :

1. $wv_{i,j}^t$ correspond à la composante d'inertie du déplacement, où le paramètre w contrôle l'influence de la direction de déplacement sur le déplacement futur ;
2. $c_1r_{1i,j}^t[pbest_{i,j}^t - x_{i,j}^t]$ correspond à la composante cognitive du déplacement, où le paramètre c_1 contrôle le comportement cognitif de la particule ;
3. $c_2r_{2i,j}^t[gbest_{i,j}^t - x_{i,j}^t]$ correspond à la composante sociale du déplacement, où le paramètre c_2 contrôle l'aptitude sociale de la particule.

Un essaim de particule est caractérisé par :

- a) le nombre de particules de l'essaim, noté nb ;
- b) la vitesse maximale d'une particule, notée $\vec{v}max$;
- c) la topologie et la taille du voisinage d'une particule qui définissent son réseau social ;

- d) l'inertie d'une particule;
- e) les coefficients de confiance, notés C1 et C2, qui pondèrent le comportement conservateur (i.e. la tendance à retourner vers la meilleure solution visitée) et le panurgisme (i.e. la tendance à suivre le voisinage)

Une particule est caractérisée, à l'instant t, par :

- $\vec{x}_i(t)$: sa position dans l'espace de recherche ;
- $\vec{v}_i(t)$: sa vitesse ;
- \vec{x}_{pbest_i} : la position de la meilleure solution par laquelle elle est passée ;
- \vec{x}_{vbest_i} : la position de la meilleure solution connue de son voisinage ;
- p_{best_i} : la valeur de fitness de sa meilleure solution ;
- g_{best} : la valeur de fitness de la meilleure solution connu du voisinage.

3.4. Notion de voisinage de PSO :

L'algorithme PSO est inspiré du comportement collectif des essaims lors des études et des simulations informatiques de groupes d'animaux (vols d'oiseaux ou bancs de poissons). Ces études mettent en évidence la capacité d'un individu à rester à une distance optimale par rapport aux autres dans le même groupe et à suivre un mouvement global affecté par les mouvements locaux de ses voisins.

À partir de ces simulations, les auteurs ont modélisé le comportement des individus par les équations (3.1) et (3.2). Dans la pratique, en utilisant l'équation (3.1), un réseau doit être défini afin d'établir des connexions entre les particules et leur permettre d'échanger des informations entre elles. Ce réseau de communication entre les particules est appelé topologie de voisinage. Cette topologie contribue à définir un groupe d'informatrices pour chaque particule, c'est ce que l'on appelle le voisinage d'une particule. Le voisinage d'une particule peut donc être défini comme le sous-ensemble de particules de l'essaim avec lesquelles celle-ci a une communication directe, i.e. chaque particule peut interroger les particules dans son voisinage (ses informatrices) qui, à leur tour, lui transmettent leurs informations.

La version globale de PSO, dans laquelle toutes les particules ont accès à l'information globale gbest de la population. Toutefois, ce n'est pas le seul choix possible, et il existe des essaims dans lesquels les particules ont accès à des informations locales, ou à des informations à la fois globales et locales.

En 1995, lorsque le premier algorithme PSO (la version globale) a été proposé, les auteurs ont choisi une topologie entièrement connectée, c'est-à-dire que chaque particule se trouve reliée à toutes les autres particules de l'essaim. Dans cette topologie, l'information utilisée dans l'équation (3.1) est globale, i.e. chaque particule vole dans l'espace de recherche du problème avec une vitesse adaptative, qui se modifie dynamiquement, selon sa propre expérience du vol et l'expérience du vol de toutes les autres particules dans l'essaim. La faiblesse de cette version est qu'elle ne fournit pas une exploration suffisante (recherche globale) de l'espace de recherche et peut conduire à une stagnation dans un optimum local et donc à une convergence prématurée [61]. De nombreuses variantes de la version originale ont alors été proposées afin d'améliorer sa convergence.

Ces variantes intègrent notamment de nouvelles topologies pour l'essaim de particules.

Nous allons traiter dans la suite ces différentes topologies, telles que les topologies locales [62, 63, 64], les topologies dynamiques et d'autres topologies plus sophistiquées, qui ont été proposées pour établir un équilibre entre la recherche locale et la recherche globale [65, 66, 67, 68, 69].

La notion de voisinage peut avoir deux types principaux, géographiques et sociaux, qui donnent aux particules une capacité de perception de leur environnement proche, selon le type utilisé (i.e. l'environnement proche peut être défini par un réseau social ou un réseau géographique).

3.4.1. Voisinage géographique :

Le voisinage géographique d'une particule i se compose des particules proches. Pour considérer cette proximité, la distance entre la particule i et les autres particules de l'essaim est utilisée, sachant que le nombre de voisins doit être défini à l'avance.

Dans [70, 71], les auteurs ont utilisé l'approche spatiale pour définir le voisinage géographique des particules. Un autre modèle d'extension spatiale des particules a été proposé dans [72] pour augmenter la diversité des particules, lorsqu'elles commencent à se regrouper. Pour remédier au problème du regroupement, un rayon r a été ajouté à chaque

particule afin de vérifier s'il y a rapprochement entre particules puis collision. Dans ce cas, les auteurs proposent plusieurs techniques pour écarter les particules et éviter la collision et donc le regroupement. Toutefois, le voisinage doit être calculé à chaque itération car les distances entre les particules peuvent changer d'une itération à l'autre au cours de la recherche. Cette méthode est donc coûteuse en termes de temps de calcul, mais elle permet par ailleurs d'apporter un certain dynamisme à la topologie.

3.4.2 .Voisinage social :

Le voisinage social d'une particule est le sous-ensemble des voisins virtuels défini au début de l'algorithme PSO ; il n'est pas nécessairement fixe et peut être adaptatif. Il peut être représenté sous la forme d'un graphe, où les particules sont des sommets reliés à leurs voisines par les arêtes du graphe. Le but d'utiliser ce type de voisinage est d'améliorer la rapidité de convergence de l'algorithme. Cela signifie qu'il est nécessaire de contrôler la propagation de l'information dans le graphe. Pour ce faire, il s'agit donc de trouver quels sont les bons paramètres (par exemple, la taille du voisinage, la forme du réseau social, la ou les sources d'influence) qui structurent le graphe et qui sont responsables de la vitesse de propagation du flux d'information. Savoir choisir la topologie est donc fondamental et demande une adaptation au problème traité. Lorsque la topologie est dense, les particules ont beaucoup de voisins, de sorte que l'information (meilleure position) est rapidement partagée. Inversement, dans une topologie éparse, l'information se propage plus lentement. Pour définir une topologie de ce type, qui peut être statique ou dynamique, on doit, créer une structure au début de l'algorithme qui définit le voisinage de chaque particule (e.g. les topologies : anneau ou Ring, étoile ou Wheel, Von Neumann, Four-clusters, etc.). Il y a aussi des topologies qui n'ont pas besoin de définir leurs structures, comme Fitness-Distance-Ratio [66] et une autre, aléatoire, qui a été proposée par Clerc [68]. D'autres modèles sociaux ont été proposés par Watts [64, 62], et se caractérisent par deux facteurs, le degré de connectivité K , qui mesure le nombre de voisins d'une particule, et la quantité de regroupement C , qui mesure le nombre de voisins d'une particule appartenant également à d'autres voisinages. Le voisinage social est le plus utilisé dans la littérature de PSO. Il est le plus simple à programmer et le moins coûteux en temps de calcul. La convergence de l'algorithme peut conduire un voisinage social à devenir un voisinage géographique.

3.5. Différents modèles de topologies :

PSO a connu deux versions originales, juste après son développement en 1995, qui sont la version globale (Gbest) et la version locale classique en anneau (Lbest classique).

En plus de ces deux modèles originaux, un grand nombre de topologies ont été proposées et beaucoup d'entre elles ont laissé un impact positif sur l'algorithme PSO en termes Topologie de voisinage dans PSO : étude et perfectionnement de performances. Nous distinguons les topologies statiques des topologies dynamiques, avant de décrire, ci-dessous, une sélection de ces topologies, qui ont été citées plusieurs fois dans la littérature et ont eu un certain succès.

3.5.1. Topologies statiques :

A l'origine, l'algorithme PSO n'utilisait pas de topologies dynamiques. Celles utilisées étaient structurées d'une manière régulière ou sur des formes géométriques. Ces topologies sont donc appelées graphes statiques, car elles sont définies une fois pour toutes. Les versions statiques les plus connues (celles qui sont principalement utilisées) sont la version globale Gbest et la version locale classique sous forme d'un anneau (Lbest classique), où chaque particule n'a que deux particules voisines. Dans le modèle Lbest classique, l'essaim converge plus lentement que dans Gbest, mais il a plus de chances de localiser l'optimum global. En général, l'utilisation du modèle Lbest permet de limiter les risques d'une convergence prématurée de l'algorithme. Ce qui a un effet positif sur les performances de l'algorithme, surtout pour les problèmes multimodaux. Kennedy et Mendes proposent plusieurs topologies statiques dans [73, 65, 74], nous présentons ci-dessous quelques-unes d'entre elles :

– Von Neumann [73] : elle est communément adoptée sur les deux modèles Gbest et Lbest classique. Dans Von Neumann, la topologie prend la forme d'une grille (réseau rectangulaire), où chaque particule est reliée à ses quatre particules voisines (à gauche, à droite, au dessus et en dessous). Comme le modèle Lbest classique, cette topologie ralentit la vitesse de convergence de l'algorithme, ce qui est prouvé par Kennedy et Mendes dans [73], en raison de sa structure particulière, qui ralentit la propagation de l'information à

toutes les particules de l'essaim. Une représentation graphique du modèle de Von Neumann est illustrée dans la figure (3.2).

– Wheel ou focal [73] : Cette topologie a la forme d'une roue, où la particule du centre de l'essaim, nommée focale (principale), est responsable du flux des informations.

Dans cette topologie, toutes les particules sont isolées les unes des autres et elles sont liées uniquement à la particule focale. Les informations doivent être communiquées à travers cette particule, qui va ensuite utiliser ces informations pour adapter sa trajectoire. Si le résultat des ajustements montre une amélioration des performances de la particule principale, alors cette amélioration sera communiquée au reste de la population. Donc la particule principale sert de filtre, qui ralentit la vitesse de transmission de l'information sur la meilleure solution trouvée. La figure 3.2 illustre une représentation graphique du modèle Wheel.

– Four-clusters [74] : La topologie Four-clusters utilise quatre groupes de particules reliés entre eux par plusieurs passerelles. Du point de vue sociologique, cette topologie ressemble à quatre communautés isolées. Dans chaque communauté, quelques particules peuvent communiquer avec une particule d'une autre communauté. Ce modèle a été étudié dans [74, 75], en prenant une taille de population égale à 20. Les particules sont divisées en quatre groupes, chaque groupe est composé de cinq particules, qui échangent l'information avec les trois autres groupes via les passerelles. Chaque passerelle n'est liée qu'à un seul groupe.

- Les caractéristiques :

Cette topologie est caractérisée par le nombre d'arêtes qui relie indirectement deux particules. Le diamètre du graphe est de trois, ce qui signifie que l'information peut être transmise d'une particule à une autre en empruntant au maximum trois arêtes. Grâce à ce diamètre, chaque particule peut obtenir une vision sur l'information globale, en effectuant au maximum trois itérations de l'algorithme. La figure (3.2) montre la représentation graphique de ce modèle. Dans [74], les auteurs ont aussi proposé un autre modèle, nommé Pyramid. Ce modèle est représenté par un rendu en fil de fer triangulaire en 3-D (ou triangular wire-frame).

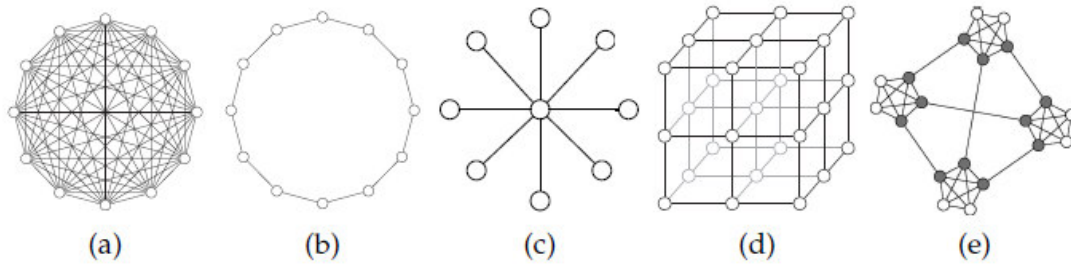


Figure 3.2: Topologies statiques : (a) Topologie Gbest, (b) Topologie en anneau (ou Ring) utilisée dans Lbest, (c) Topologie en étoile (ou Wheel), (d) Topologie Von Neumann et (e) topologie Four-clusters [73,74].

3.5.2. Topologies dynamiques :

En général, les différentes topologies statiques proposées dans la littérature de PSO ne résolvent pas le problème de la convergence prématurée de PSO, même si beaucoup d'entre elles améliorent ses performances. La recherche s'est donc poursuivie, visant toujours à élaborer une topologie robuste permettant d'améliorer les performances de l'algorithme.

Les auteurs ont alors essayé de mettre en place des topologies dynamiques. Ils ont trouvé que ces topologies pouvaient avoir de meilleures performances que les topologies statiques, et ce, au moyen d'un changement de leurs structures, d'une itération à l'autre.

Ce changement permet aux particules de changer leurs trajectoires de déplacement, afin de pouvoir s'échapper des optima locaux.

3.6. Coefficient d'inertie :

Le coefficient d'inertie w , introduit par Shi et Eberhart [61], contrôle l'influence de la direction de la particule sur le déplacement futur. Le but de l'introduction de ce paramètre est de réaliser un équilibre entre la recherche locale (exploitation) et la recherche globale (exploration). L'intensité de l'exploration de l'espace de recherche dépend de la valeur du poids d'inertie, une grande valeur de w facilitant une exploration globale, alors qu'une petite valeur facilite l'exploration locale. Du fait de son influence sur les performances de l'algorithme PSO, le poids d'inertie a suscité un grand intérêt de la part de la communauté des chercheurs. Dans [61], les auteurs ont proposé un coefficient d'inertie dynamique qui varie au cours du temps. Il commence par une valeur proche de 0,9 et descend linéairement pour arriver à 0,4. Cette stratégie a beaucoup amélioré les performances de PSO pour

plusieurs problèmes d'optimisation. Le coefficient d'inertie w varie linéairement avec le temps selon la formule suivante :

$$w = w_{\min} + (w_{\max} - w_{\min}) \cdot (\text{iter} / \text{maxiter}) \quad \dots\dots\dots (3.3)$$

Où iter est l'itération courante et maxiter est le nombre maximal d'itérations. w_{\max} et w_{\min} désignent respectivement les valeurs maximum et minimum du coefficient w (généralement, $w_{\min}, w_{\max} \in [0, 1]$).

Dans [76], Chatterjee et Siarry ont utilisé une autre stratégie non-linéaire pour définir un coefficient d'inertie dynamique. Dans [77], Eberhart et Shi ont proposé une autre variante, dans laquelle le coefficient d'inertie est choisi au hasard, selon une distribution uniforme, dans l'intervalle $[0,5, 1]$. Cet intervalle a été inspirée du facteur de constriction proposé par Clerc et Kennedy (la valeur attendue du coefficient d'inertie, dans ce cas, est égale à $0,75 \approx 0,729$).

3.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la définition d'un problème d'optimisation. Tout d'abord, nous avons donné les deux types de problèmes d'optimisation mono-objectif difficile. Puis, nous avons décrit une famille de méthodes d'optimisation à savoir la méthode PSO. Enfin, nous avons présenté les types de voisinage et les différentes topologies de cette méthode d'optimisation.

Chapitre 4 : *Dimensionnement*

4.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons le dimensionnement et la simulation d'un système hybride pour l'électrification rurale d'un site dans le sud Algérien en utilisant l'optimisation par essais des particules (PSO). Le programme de simulation est réalisé sous Matlab. Nous avons réalisé une évaluation technico-économique sur le système hybride pour le même site rural. Les étapes de calcul sont les suivantes :

- Présentation des Ressources météorologiques et profil de charge.
- Organigramme d'optimisation et simulation.
- Calcul du bilan énergétique et analyse des résultats obtenus.

4.2. Présentation des Ressources météorologiques et profil de charge:

4.2.1. Présentation de site:

Le site choisi pour notre étude est un village rural saharien isolé nommé "*Ilamane*". Ces données géographiques sont comme suit : Latitude: 23.12° N, Longitude: 5.27° E et Altitude: 1928 m. Ce village est situé dans la wilaya de Tamanrasset et il est constitué d'un nombre réduit de foyers. L'électrification du village par les filières classiques (diesel, réseau électrique), en plus des coûts de réalisation excessifs, auraient posé le problème de l'acheminement du combustible. Dans le cas du réseau; des difficultés certaines pour les travaux et la maintenance des lignes aériennes ne sont pas à écarter. Le solaire photovoltaïque associé à un groupe électrogène comme appoint pourrait alors constituer une solution durable et plus appropriée pour une alimentation en énergie propre et non polluante.

4.2.2. Les données météorologiques utilisées :

Les performances des modules photovoltaïques sont directement corrélées aux données climatiques qui sont en principe l'irradiation solaire et la température ambiante. Ces données sont prises grâce au système d'acquisition pour l'année 2012 mesurées à un pas de temps fin qui est de 10 minutes. Pour chaque jour de l'année le kit prévoit l'acquisition des grandeurs ci-dessous:

TA : Température ambiante exprimée en degré Celsius (C°)

R-Sol : Eclairement solaire incident exprimée en Watt par mètre carré (W/m²).

La taille de chaque vecteurs de grandeur (6 * 366 jours * 24 heures = 52704 données) est trop importante pour un calcul rapide ; il est donc nécessaire de le réduire. Pour cela, nous avons choisi de prendre un pas de temps d'une heure, alors la taille du vecteur devient (366 jours*24 heures = 8784). L'évaluation annuelle des caractéristiques climatiques du site est présentée dans la figure 4.1

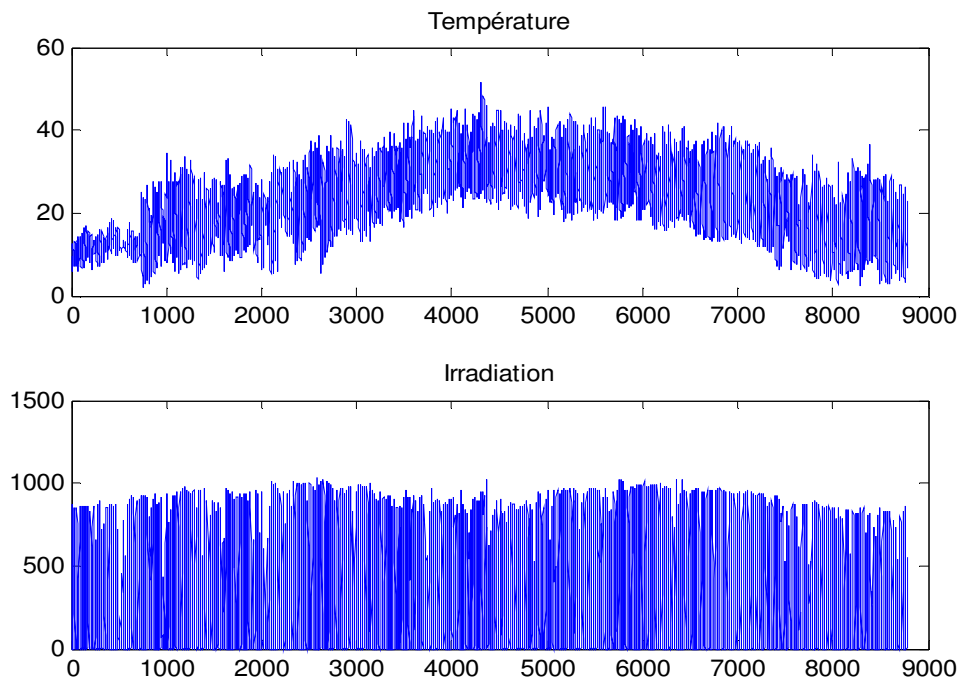


Figure 4.1: caractéristiques climatiques du site.

4.2.3. Le profil de charge :

Nous avons considéré deux profils de charge ; hivernal (S1: Octobre; Novembre; Décembre, Janvier, Février; Mars) et estival (S2 : Avril, Mai, Juin, Juillet, Aout, Septembre), les tableaux (1.3) et (1.4) présentent respectivement le profil de consommation énergétique horaire et journalière pour les périodes estivale et hivernale.

Nous supposons pour [6]:

- L'éclairage :

Le nombre d'heures d'éclairage dépend de la durée du jour selon les saisons. En plus, dans les régions rurales, les heures du lever et du coucher des habitants sont fortement liés à l'heure du lever et du coucher du soleil.

Ainsi dans ce travail, le début d'utilisation de la lumière est supposée être à 06:00 h du matin pour les deux saisons. Par contre, la lumière s'éteint à 22:00h en Hiver et 23:00h en Eté.

La puissance de l'éclairage change d'un endroit à l'autre et elle est liée à la surface des chambres et la fréquence d'utilisation.

- La réfrigération :

La puissance moyenne du réfrigérateur est supposée égale à 40 W. Le nombre d'heures de fonctionnement du réfrigérateur est considéré 24h/24h pour les deux saisons.

- La ventilation :

Nous supposons qu'il n'est sollicité que durant la période estivale (Avril-Septembre) et le nombre d'heures d'utilisation est 5 h / 24 h.

Nature		Puissance (Watt)	
Eclairage	CZ	Cuisine	15
	C1	Chambre1	15
	C2	Chambre2	15
	SL	Salon	27
	DCH	Douche	11
	WC	WC	9
	CO	Cour	15
Equipements	VL	Ventilateur	45
	TV	Television	75
	F	Frigo	40
	DM	Demosat	40
	R	Radio	30

Tableau 4.1: Profil de consommation utilisé dans notre étude [6].

Hr	Oct-Nov-Dec-Jan-Fev-Mar			Avr-Mai-Juin-Juil-Aout-Sept		
	Activité	1xHab	10 x Hab	Activité	1xHab	10 x Hab
1	F	0.040	0.400	F	0.040	0.400
2	F	0.040	0.400	F	0.040	0.400
3	F	0.040	0.400	F	0.040	0.400
4	F	0.040	0.400	F	0.040	0.400
5	F	0.040	0.400	F	0.040	0.400
6	F+CZ+WC+DCH	0.060	0.600	F+WC+DCH	0.060	0.600
7	F+CZ+WC+DCH+C1+C2	0.090	0.900	F+WC+DCH	0.060	0.600
8	F+CZ+WC+DCH+C1+C2	0.090	0.900	F	0.040	0.400
9	F+R	0.070	0.700	F+R	0.070	0.700
10	F+R	0.070	0.700	F+R	0.070	0.700
11	F+R	0.070	0.700	F+R	0.070	0.700
12	F+R	0.070	0.700	F+TV+DM	0.155	1.550
13	F+TV+DM	0.155	1.550	F+TV+DM	0.155	1.550
14	F+TV+DM	0.155	1.550	F+TV+DM+VL	0.200	2.000
15	F	0.040	0.400	F+VL	0.085	0.850
16	F	0.040	0.400	F+VL	0.085	0.850
17	F+CZ	0.055	0.550	F+VL	0.085	0.850
18	F+TV+DM+CZ+C1+SL+CO	0.227	2.270	F+TV+DM+VL	0.200	2.000
19	F+TV+DM+CZ+C2+SL+CO	0.227	2.270	F+TV+DM+CO	0.170	1.700
20	F+TV+DM+SL+CO	0.197	1.970	F+TV+DM+CO	0.170	1.700
21	F+TV+DM+SL+CO	0.197	1.970	F+TV+DM+CO+C1	0.185	1.850
22	F+TV+DM+SL+CO	0.197	1.970	F+TV+DM+CO+C2	0.185	1.850
23	F	0.040	0.400	F+TV+DM+CO	0.170	1.700
24	F	0.040	0.400	F+CO	0.055	0.550
	Energie totale (KWh/j)	2.290	22.900	Energie totale (KWh/j)	2.470	24.700

Tableau 4.2 : Profil de consommation énergétique horaire [6].

4.3. Les différents éléments du système :

Avant d'entamer le dimensionnement de notre système, nous présentons ses principaux éléments.

4.3.1. L'onduleur :

Les caractéristiques principales d'un onduleur autonome sont les suivantes :

- La tension d'entrée (12V, 24V ou 48V).
- La tension de sortie 220 AC à 50Hz.
- Le rendement généralement >90% en fonctionnement nominal.
- La consommation en mode veille (2 ou 3% de la puissance nominale).
- Les protections (court-circuit charge, chute de tension coté batterie).
- Le prix très variable selon le type et la puissance des charges utilisées.

4.3.2. Les batteries :

Les batteries choisies seront de préférence :

- Des batteries fermées (Valve Regulated Lead Acid) dans lesquelles l'électrolyte est stabilisé par un gel ou un matériau AGM (Absorbent Glass Mat)
- Des batteries à plaques tubulaires dites batteries « stationnaire ».

Pour les systèmes de petite puissance, une tension de 12V est préférée, les récepteurs alimentés en 12V étant plus fréquents, mais au-delà de 2.5 KWh stockés, on passera en 24V ou plus pour limiter les pertes ohmiques en gardant des sections de câble raisonnables. Les batteries sont commercialisées en cellules de 2V, de 200Ah à 3000 Ah ou en ensemble 12V jusqu'à 400Ah.

4.3.3. Régulateur de charge :

Le régulateur doit assurer des fonctions de protections :

- Pour éviter une décharge de la batterie dans le panneau.
- Pour éviter une surcharge ou une décharge profonde de la batterie.
- En cas de court-circuit coté charge.

Son rôle est aussi de contrôler le transfert d'énergie entre le générateur photovoltaïque, la batterie et la charge en fonction :

- De la disponibilité de la ressource et de l'état de charge de la batterie.
- Du caractère prioritaire ou non de la charge.

4.3.4. Générateur photovoltaïque :

Les caractéristiques électriques de notre panneau photovoltaïque sont données dans le tableau suivant :

Module Atersa 75A	Caractéristiques électriques
Puissance crête (W_p)	75 W
Tension de circuit ouvert (V_{oc})	21.9 V
Tension max (V_{mp})	17.85 V
Courant de court-circuit (I_{sc})	4.6 A
Courant max (I_{mp})	4.2A

Tableau 4.3: Les caractéristiques électriques du module Atersa 75A sous les conditions standards (STC)

Pour utiliser au mieux le module photovoltaïque, nous chercherons son fonctionnement au maximum de puissance disponible. Ainsi, le régulateur doit inclure une fonction dite « MPPT » (Maximum Power Point Tracking) qui jouera le rôle d'adaptateur d'impédance entre le module photovoltaïque et la charge [78].

4.4. Dimensionnement du système :

Le dimensionnement d'une installation photovoltaïque revient à déterminer le nombre nécessaire des modules photovoltaïques constituant le générateur photovoltaïque ainsi que la capacité de charge des batteries. Ces deux éléments sont les plus importants en raison du coût élevé qu'ils totalisent, plus de 50% du prix de l'installation et aussi la puissance du groupe électrogène utilisé.

4.4.1. Dimensionnement du générateur photovoltaïque sous Matlab:

Le but de l'optimisation du système avec l'algorithme PSO est de trouver la meilleure configuration possible en termes de coût d'une part et qui satisfait les contraintes du système et la demande en électricité d'autre part. Le coût actuel net (ACS) est la fonction objective du système, ce coût combine le coût en capital ACC, le coût de remplacement ARC, le coût du carburant AFC, et le coût de maintenance AOM. Les paramètres économiques du système sont présentés dans le tableau 4.4. L'organigramme d'optimisation du système est illustré dans les figures (4.2), figure (4.3).

Taux d'intérêt nominal i_1 (%)	0.146
Taux d'inflation f (%)	0.0817
durée de vie du projet (year)	20
Banques de batteries vie (year)	5
fiabilité des panneaux photovoltaïques	0.98
Fiabilité de l'inverseur	0.98
la fiabilité de la batterie	0.98
Fiabilité de l'unité DG	0.9
Coût de carburant	0.22
Facteur d'émission	2.5

Tableau 4.4 : Les paramètres économiques du système.

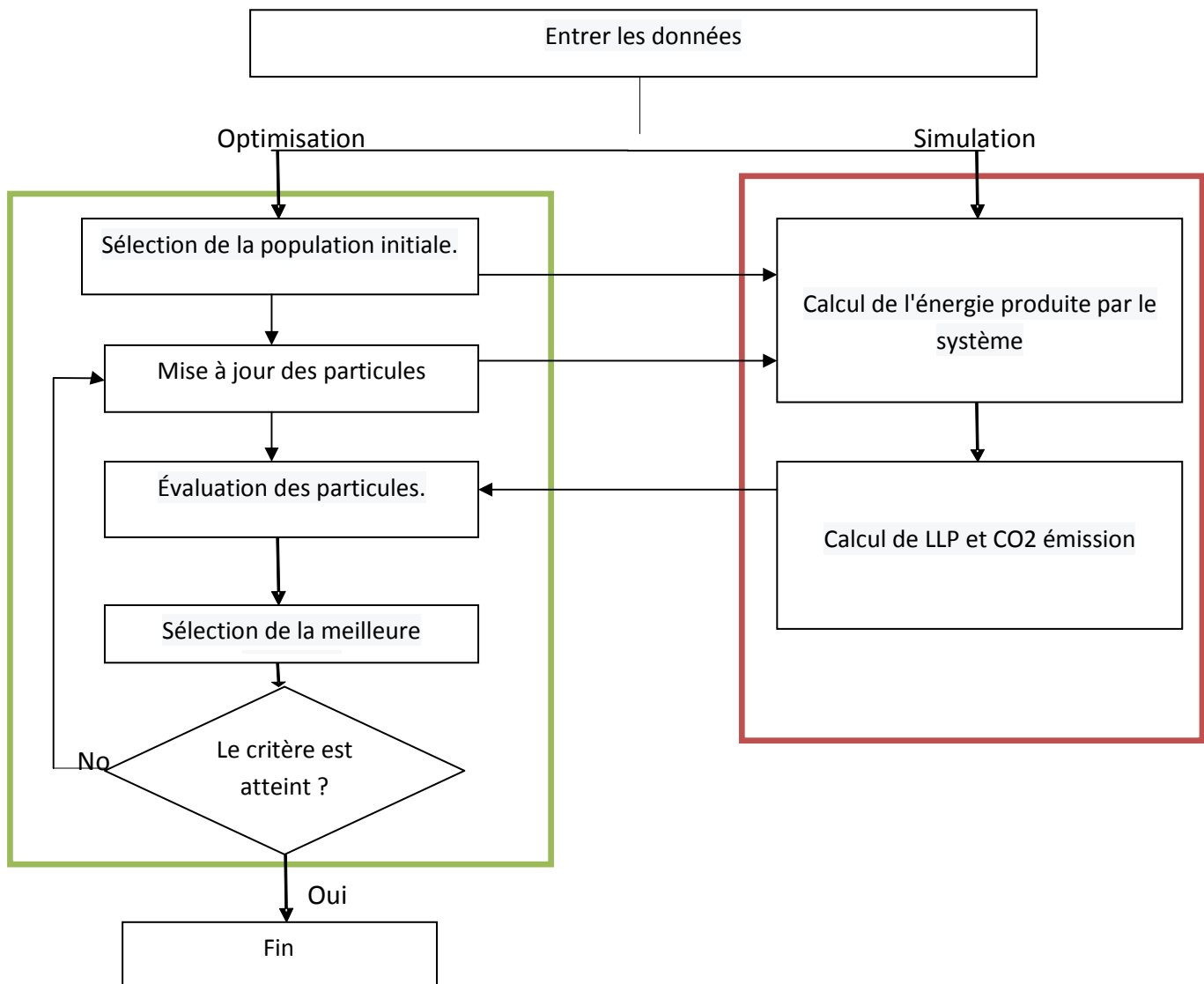


Figure 4.2 : Organigramme de simulation de PSO

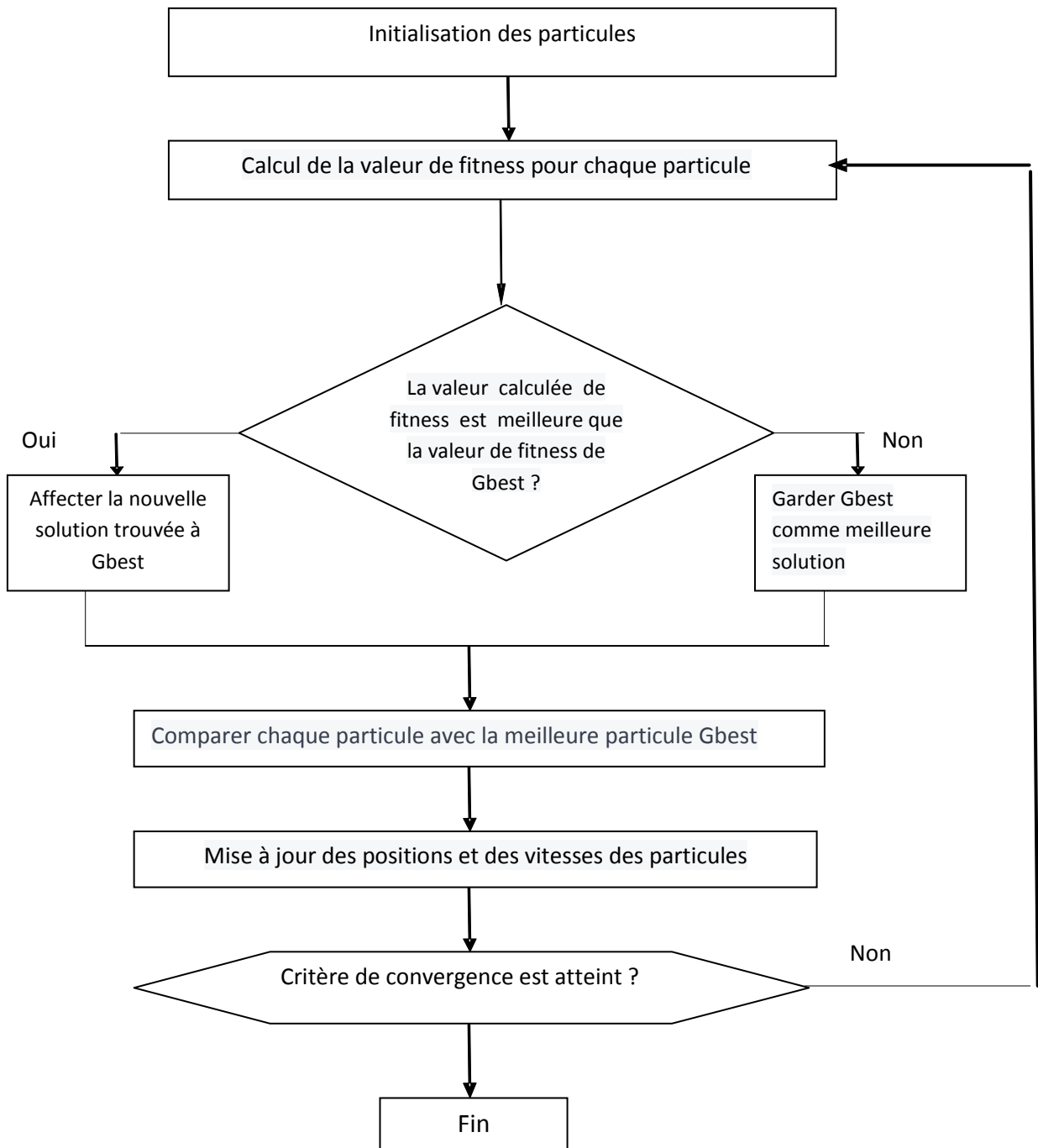


Figure 4.3 : Organigramme de l'algorithme de PSO.

4.4.2. Simulation du comportement du système :

- **Paramètres d'entrée du système :**

Le programme d'optimisation et simulation du système est développé sous Matlab. Les paramètres du PSO consistent de 30 particules et 50 itérations, chaque particule comprend 3 vecteurs qui représentent la taille de panneaux photovoltaïques, de batteries et la capacité de générateur diesel. La simulation a été basée sur les paramètres d'entrée du système suivants :

- **le module photovoltaïque :**

- la marque : Atersa 75A.
- La puissance maximale crête du module $P_c=75W$.
- La tension de circuit ouvert $V_{oc} = 21.9 V$.
- Le courant de court circuit $I_{sc}=4.6 A$.
- La tension crête maximale $V_m = 17.85 V$.
- Le courant maximal crête $I_m = 4.2 A$.

- **la batterie de plomb :**

- Rendement des batteries $\eta_{bat}=85\%$.
- Tension du banc des batteries $=48 V$.

- **Convertisseur AC/DC :**

- Rendement : 98%.
- Tension d'entrée : 48 Vdc.

- **le groupe électrogène :**

- Type de fuel : diesel.
- Puissance du groupe électrogène est entre 2Kw et 3Kw.

Selon les conditions météorologiques (éclairage et température), nous avons simulé le système hybride et nous avons abouti aux courbes de convergence de l'algorithme de PSO pour 4 simulations indépendantes représentées dans la figure 4.4. On peut voir que les valeurs optimales sont obtenues après environ 7 itérations. En outre, il peut être observé que la valeur optimale pour tous les essais converge vers presque la même valeur optimale (optimum global).

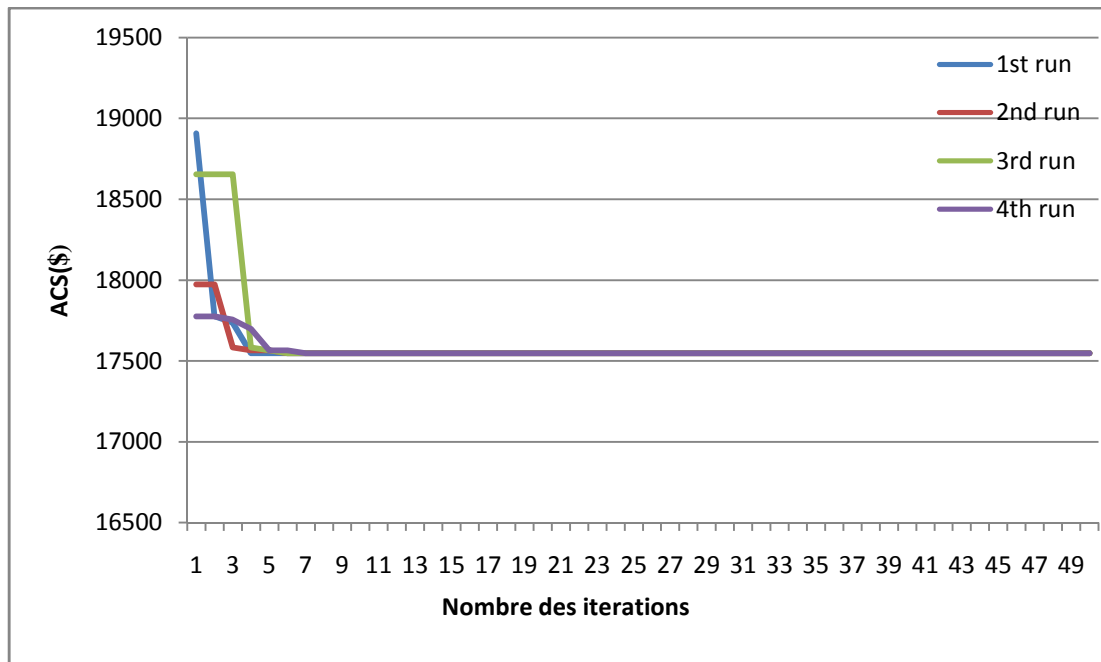


Figure 4.4 : Convergence de l'algorithme de PSO.

Pour notre système, nous avons choisi une perte d'énergie $LP = 0.03$ et une consommation du fuel $FC \leq 200$ Litres/an qui donnent les résultats suivants :

LP=3% et FC<=200 Litres	
Nombre des Panneaux	75
Nombre des batteries	90
Puissance du groupe électrogène	2

Tableau 4.5: Résultats du dimensionnement.

Puissance photovoltaïque	5.625 KW
Capacité des batteries	180 KW
Puissance du groupe électrogène	2 KW
Consommation annuelle du groupe électrogène en fuel	181 Litres/an
Energie photovoltaïque annuelle	9780.41 KWh/an
Energie annuelle produite par le groupe électrogène	354.06 KWh/an
Le pourcentage du photovoltaïque	96.5%
Groupe électrogène	3.5%
Les heures de fonctionnement du groupe électrogène	577

Tableau 4.6: Bilan énergétique du système.

Composent	ACC (\$)	O&M (\$)	ARC(\$)	Fuel (\$)	Total (\$)
Générateur photovoltaïque	1122.9	12.937	0	/	1135.83
Groupe électrogène	65.093	3.75	0	10.46	79.30
Hoppecke 20 OPzS 2500	9088	153.36	6808.9	/	16050.26
Convertisseur	347.11	4	0	/	351.11
Système	10623.07	174.04	6808.94	10.46	17617

Tableau 4.7 : Bilan économique du système.

4.5. Discussion des résultats :

Notre programme effectue un bilan énergétique pour chercher la solution optimale selon le plus faible coût et en respectant les contraintes.

- Le tableau 4.5 présente la solution optimale obtenue : (75 X 75W) panneaux photovoltaïque, (90 X 2KWh) capacité des batteries et 2 KW puissance du groupe électrogène, un onduleur d'une capacité de 6 KW.
- Le bilan énergétique montre que 96% de l'énergie produite est une énergie renouvelable, cette fraction correspond a une énergie de 9780 KWh/an, la consommation en fuel est 181 litres et une charge primaire servie c'est-à-dire, nous avons obtenu une satisfaction totale.
- En utilisant l'algorithme du PSO le coût actuel du système minimisé est 17617 \$, environ 91% de ce coût est le coût du banc des batteries.

4.6. Conclusion :

Notre travail a porté sur le dimensionnement et la simulation d'un système hybride (PV-Diesel) en utilisant l'optimisation par l'essaim des particules PSO et à l'aide de logiciel Matlab. L'analyse des résultats obtenus par la simulation du fonctionnement du système hybride pour le site d'Illamane de la wilaya de Tamanrasset, nous a permis de noter les conclusions suivantes :

- Les résultats de la simulation montrent que le critère d'optimisation de la chaîne de conversion basé sur l'optimisation *méta-heuristique* par essaim de particules OEP (PSO) est un critère fiable.
- Les performances et les dimensions du système hybride sont liées aux conditions climatiques du site, les caractéristiques techniques de composants constituant le système, ainsi qu'au profil de charge choisi.
- Les systèmes solaires hybrides qui utilisent une source d'énergie d'un générateur Diesel sont plus performants et moins chers que ceux qui n'utilisent que des ressources renouvelables Solaire, mais, ils émettent plus de dioxyde de carbone (CO₂) qui menace la prospérité de l'écosystème.

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est d'examiner la possibilité et les performances d'électrifier une communauté rurale par la solution hybride, alors nous nous sommes aperçues que le fonctionnement du système dépend non seulement des variables d'entrée et de sortie qui sont l'ensoleillement, la température et la charge à alimenter, mais aussi de l'interdépendance entre les différents équipements. Un composant du système mal dimensionné peut compromettre le bon fonctionnement de toute l'installation. Ainsi, à partir des résultats obtenus, nous pouvons conclure que la combinaison des deux sources d'énergie (PV-Diesel) est nécessaire pour permettre de couvrir les déficits énergétiques et de répondre à la demande énergétique grandissante des habitants ruraux. Cette demande grandissante est due essentiellement à la demande de plus en plus grandissante du confort à la maison, plus d'équipements électriques.

Nous avons suivi une méthodologie qui se base sur l'optimisation *méta-heuristique* par essaim de particules OEP (Particle Swarm Optimization (PSO) en anglais) de la chaîne de conversion. La programmation et la simulation ont été réalisées sous Matlab.

Une installation hybride réussie nécessite une démarche d'économie d'énergie, puis une conception et une installation rigoureuse avec des composants qui répondent au besoin. Nous pensons que les résultats techniques et économiques de la simulation obtenus étaient satisfaisants et ont montré l'efficacité et la rentabilité du système hybride étudié.

Dans l'avenir, nous souhaiterions que nous puissions apporter plus d'affinité pour ce travail comme par exemple :

- L'amélioration du système de stockage par l'utilisation d'autres techniques de stockage, batteries de haut rendement et de grande durée de vie.

- L'exploitation d'une autre source renouvelable tel que l'éolien pour assurer une grande part de l'énergie renouvelable dans le système hybride.

Bibliographie

- [1] M. Angel Cid Pastor « Conception et Réalisation de Modules Photovoltaïques» Spécialité : Conception des Circuits Microélectroniques et Microsystèmes 2010.
- [2] I.Vechiu, “ *Modélisation et Analyse de l’Intégration de des Energies Renouvelables Dans un Réseau Autonome* ”, Thèse de Doctorat, Université de Havre, Année 2005.
- [3] C. P. De Brichambaut, C. Vauge, « Le gisement solaire évaluation de la ressource énergétique », (1981).
- [4] Yves Jannot « Thermique solaire », Octobre 2003.
- [5] Belakehal Soltane, "Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables", thèse de Doctorat, université de Constantine, 10/06/2010
- [6] Fodhil Fadhila, " Performances des Réseaux Multi Hybrides Solaires (MGS) Dans L’électrification Rurale", Mémoire de Magister, université de Blida, 2010.
- [7] Belhadj Mohammed, "Modélisation D’un Système De Captage Photovoltaïque Autonome", Mémoire de Magister, université de Bechar, 2008.
- [8] Louazene Mohamed Lakhdar, "Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla", Mémoire de Magister, université de Batna, 12/06/2008.
- [9] Guendouz Bouhelal, "L'utilisation de L'énergie solaire pour Les besoins de la climatisation ", Mémoire de Magister, université de Tlemcen, 2012
- [10] G. N. Tiwari, S. K. Shukla, I.P. Singh, « Computer Modeling of Passive/Active Solar Stills by Using Inner Glass Temperature », Journal of Desalination, Vol.154, (2003).
- [11] J. Royer, T. Djiako, E.Schiller et B. SadaSy . « Le pompage photovoltaïque’ Manuel de cours à l’intention des ingénieurs et des techniciens ». Publ. en collab. avec : IEPF, Université d’Ottawa, EIER, CREPA. 1998. ISBN 2-89481-006-7.
- [12] Maryse Labriet. ‘Énergie et développement durable en Méditerranée’, Revue Liaison Énergie-Francophonie N °71–2e Trimestre 2006, Page 95 ISSN 0840-7827.
- [13] M. Brahimi. « Situation des énergies renouvelables en Algérie ». Conférence sur la maîtrise de l’énergie et de l’environnement dans un contexte d’économie de marche, 22 et 23 mai 2001, Hôtel Sheraton, Alger, Algérie.
- [14] A. Ainouche « Natural gas and Algerian strategy for renewable energy», 23rd World GAS Conference, Amsterdam, 2006.
- [15] Bencherif Mohammed « Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension », thèse du Docteur en physique, université de Tlemcen ,2010
- [16] EurObserv’ER, “ le baromètre européen 2005 des énergies Renouvelables ” ,5eme bilan, système solaire, n°165 à170 ,2005
- [17] S. Moussa, A. Kaabèche et M. Belhamel, « Evaluation des Performances d’un Système Hybride de Production d’Electricité -Fourniture d’énergie électrique sans interruption au moyen d’un système hybride (solaire, éolien, et diesel) totalement autonome », Revue des Energies Renouvelables, pp : 247-250, 1999
- [18] M. Belhamel, S. Moussa et A. Ka abèche, « Production d’Electricité au Moyen d’un Système

- Hybride (Eolien- Photovoltaïque -Diesel) », revue des énergies renouvelables, pp.49-54, 2002.
- [19] A. El Khadimi, L. Bachir et A. Zeroual, « Dimensionnement et optimisation technico-économique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque - éolien avec système de stockage », Revue des Energies Renouvelables, Vol. 7, pp : 73-83, (2004)
- [20] D. Kousa, M. Alem et M. Belhamel, « Système Hybride (Eolien, Solaire) pour l'Alimentation électrique d'une Charge à usage Domestique », Revue des Energies Renouvelables, pp :1-8, 2002.
- [21] O.Gergaud. « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolienne et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan, France, 2002.
- [22] European Photovoltaic Industry Association and Greenpeace. Solar Generation V. Report EPIA, 2008
- [23] R. Kaiser. « Optimized battery-management system to improve storage lifetime in renewable energy systems ». Journal of Power Sources, vol.168:58–65, 2007.
- [24] Yaël Thiaux. « Optimisation des profils de consommation pour minimiser les coûts économique et énergétique sur cycle de vie des systèmes photovoltaïques autonomes et hybrides Évaluation du potentiel de la technologie Li-ion. », thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan..Soutenue le 08 Juillet 2010.
- [25] B. Wickert, C.V. Nayar and W.B. Lawrance, « Photovoltaic-Diesel Hybrid Energy Systems for Off-Grid Rural Electrification », International Journal of Renewable Energy Engineering, Vol. 1, N°1, pp. 7 - 17, 1999.
- [26] Mauch K., Operating Agent current state of the art in pv hybrid mini-grids – early results from IEA PVPS task 11, <http://www.iea-pvps-task11.org/id26.htm>.
- [27] A. Laugier and J.A. Roger. « Les photopiles solaires ». Edition Technique et documentation, 1981.
- [28] A.Hamidat, B.Benyoucef. Mathematic models of photovoltaic motor-pump systems. Renewable Energy 33 (2008), pp: 933-942.
- [29] D.S.H. Chan, J.R Philips and J.C.H. Phang. « A comparative study of extraction methods for solar cell model parameters ». Solid State Electronic, Vol 29(3), pp 329-337, 1986.
- [30] E.Lorenzo. Electricidad Solar: Ingeniera de los sistemas fotovoltaicos.Instituto de Energia Solar, Universidad Politécnica de Madrid, Progensa.Sevilla, 1994.
- [31] D. Saheb, Koussa et M. Belhamel : «Contribution à l'étude théorique du comportement d'un système hybride (éolien – photovoltaïque - diesel) de production d'électricité sans interruption». Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°1 (2008) 137 – 151.
- [32] A. Ould Mohamed Yahya , A. Ould Mahmoud et I. Youm : « Modélisation d'un système de stockage intégré dans un système hybride (PV / Eolien / Diesel) ». Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°2 (2007) 205 – 214.
- [33] Massé René, « Financer le développement de l'électrification rurale », Coll. Études et Travaux, série en ligne n°2, Éditions du Gret, 2004, www.gret.org, p 108.
- [34] M. Muselli, G. Notton, A. Louche, « Design of hybrid photovoltaic power generator with optimization of energy management », Solar Energy Vol. 65, No 3, pp 143-157.
- [35] Abouzahr I., Ramakumar R: « Loss of power supply probability of stand-alone wind electric conversion systems », a closed solution approach. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1990, vol. 5, n° 3, pp. 445-452.
- [36] Abouzahr I., Ramakumar R. «Loss of power supply probability of stand-alone photovoltaic systems», a closed solution approach. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1991, vol. 6, n° 1, pp. 1-11.
- [37] Ghali F.M.A, Abd El Aziz M.M, Syam F.A. « Simulation and analysis of Hybrid systems using probabilistic techniques ». Proceedings of the IEEE Power Conversion Conference (PCC) Nagaoka, 1997, pp. 831-835.
- [38] Giraud F., Saameh Z.M. «Steady-state performance of a grid-connected rooftop hybrid wind-photovoltaic power system with battery storage ». IEEE Transactions on energy conversion, ISBN 0885-8969, 2001, vol. 16, n° 1, pp. 1-7.
- [39] Enrico FABRIZIO. «Modélisation des systèmes multi énergies dans les bâtiments ». Thèse de doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, juillet 2008.
- [40] A. Kaabeche, M. Belhamel , R. Ibtouen , S. Moussa .M. R. Benhaddadi : « Optimisation d'un système hybride (éolien – photovoltaïque) totalement autonome ». Revue des Energies renouvelables. Vol. 9, N°3 (2006) 199 – 209.

- [41] A.Hamidat, B.Benyoucef. Systematic procedures for sizing photovoltaic pumping system, using water tank storage. *Energy Policy* 37 (2009) 1489–1501.
- [42] B.S. Borrowy and Z.M. Salameh, «Methodology for Optimally Sizing the Combination Battery Bank and PV Array in a Wind/PV Hybrid System», *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol. 12, N°1, pp. 73 - 78, March 1997.
- [43] E. Ofry and A. Brauntein, «The Loss of Power Supply Probability as a Technique for Designing Stand-alone Solar Electrical (Photovoltaic) Systems », *IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, N°5, pp. 1171 - 1175, May 1983.
- [44] Rodolfo DL, Jose LBA. Multi-objective design of PV-wind-diesel –hydrogen-battery systems. *Renew Energy* 2008; 33(12):2559e72.
- [45] Abedi S, Alimardani A, Gharehpetian GB, Riahy GH, Hosseinian SH. A comprehensive method for optimal power management and design of hybrid RES-based autonomous energy systems. *Renew Sustain Energy Rev* 2012; 16(3):1577e87.
- [46] Riccardo Poli, James Kennedy, and Tim Blackwell. Particle swarm optimization. *Swarm Intelligence*, 1(1):33–57, 2007.
- [47] Russell C. Eberhart, Yuhui Shi, and James Kennedy. *Swarm Intelligence. The Morgan Kaufmann Series in Artificial Intelligence*. Morgan Kaufmann, San Francisco, CA, USA, 2001.
- [48] Craig W. Reynolds. Flocks, herds, and schools: A distributed behavioral model. *Computer Graphics*, 21(4):25–34, 1987.
- [49] F. Heppner and U. Grenander. A stochastic nonlinear odel for coordinated bird flocks. AAAS Publication, Washington, DC, 1990.
- [50] J. Dréo, A. Pétrowski, P. Siarry, and E. Taillard. *Métaheuristiques pour l’Optimisation Difficile*. Eyrolles, 2003.
- [51] T. H. Cormen, C. E. Leiserson, and R. L. Rivest. Introduction to algorithms, chapitre 16 : Greedy Algorithms. MIT Press and McGraw-Hill, 1st Ed., 1990.
- [52] R. A. DeVore and V. N. Temlyakov. “Some remarks on greedy algorithms”. *Advances in Computational Mathematics*, Vol. 5, No. 1, pp. 173–187, 1996.
- [53] V. R. Basili and A. J. Turner. “Iterative enhancement : A practical technique for software development”. *IEEE Transactions on Software Engineering*, Vol. 1, No. 4, pp. 390–396, 1975
- [54] F. Glover. “Future paths for integer programming and links to artificial intelligence”. *Computers and Operations Research*, Vol. 13, pp. 533–549, 1986.
- [55] Y. Collette and P. Siarry. *Optimisation multiobjectif*. Eyrolles, 2002
- [56] D. E. Goldberg and J. Richardson. “Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization”. In : *Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms on Genetic algorithms and their application*, pp. 41–49, Lawrence Erlbaum Associates., Mahwah, NJ, USA, 1987.
- [57] J. Branke. *Evolutionary Optimization in Dynamic Environments*. Kluwer Academic, 2002
- [58] E. G. Talbi. “A Taxonomy of Hybrid Metaheuristics”. *Journal of Heuristics*, Vol. 8, No. 5, pp. 541–564, 2002.
- [59] E. Alba. *Parallel Metaheuristics : A New Class of Algorithms*. JohnWiley & sons, 2005.
- [60] J. Kennedy and R. C. Eberhart. “Particle Swarm Optimization”. In : *Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks IV*, pp. 1942–1948, Perth, Australia, November 1995.
- [61] Y. Shi and E. R. C. “Empirical study of particle swarm optimization”. Vol. 3, pp. 1945–1950, 1999.
- [62] D. J. Watts and S. H. Strogatz. “Collective dynamics of ‘small-world’ networks”. *Nature*, Vol. 393, No. 6684, pp. 440–442, June 1998.
- [63] P. N. Suganthan. “Particle swarm optimiser with neighbourhood operator”. In : *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation, CEC 99*, pp. 1958–1962, Washington, DC USA, 1999.
- [64] D. J. Watts. *Small worlds : The dynamics of networks between order and randomness*. Princeton University Press, Princeton, NJ, 1999.
- [65] J. Kennedy. “Small worlds and mega-minds : effects of neighborhood topology on particle swarm performance”. In : *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation, CEC’99*, pp. 1931–1938, Washington, DC USA, 1999.
- [66] T. Peram, K. Veeramachaneni, and C. K. Mohan. “Fitness-distance-ratio based particle swarm optimization”. In : *Proc. IEEE Swarm Intelligence Symposium*, pp. 174–181, Indianapolis, Indiana, USA, 2003.

- [67] M. Richards and D. Ventura. "Dynamic Sociometry in Particle Swarm Optimization". In : Joint Conference on Information Sciences, pp. 1557–1560, Cary, North Carolina USA, 2003.
- [68] M. Clerc. Particle Swarm Optimization. ISTE (International Scientific and Technical Encyclopaedia), 2006.
- [69] Y. X. Wang and Q. L. Xiang. "Particle Swarms with dynamic ring topology". In : Proceedings of the IEEE Congress on Evolutionary Computation, pp. 419–423, IEEE, 2008
- [70] J. Lane, A. Engelbrecht, and J. Gain. "Particle swarm optimization with spatially meaningful neighbours". In : Proceedings of the 2008 IEEE Swarm Intelligence Symposium. Piscataway, NJ : IEEE, pp. 1–8, Press, 2008.
- [71] E. Safavieh, A. Gheibi, M. Abolghasemi, and A. Mohades. "Particle swarm optimization with Voronoi neighborhood". In : Proceedings of the 14th International CSI Computer Conference (CSICC2009), pp. 397–402, Tehran, Iran, 2009.
- [72] T. Krink, J. S. Vesterstrom, and J. Riget. "Particle swarm optimisation with spatial particle extension". In : Proc. IEEE Congress on Evolutionary Computation, pp. 1474–1479, Honolulu, Hawaii USA, May 2002.
- [73] J. Kennedy and R. Mendes. "Population Structure and Particle Swarm Performance". In : Proceedings of the 2002 IEEE Congress on Evolutionary Computation, CEC'02, pp. 1671–1676, Honolulu, HI, USA, 2002.
- [74] R. Mendes, J. Kennedy, and J. Neves. "The Fully Informed Particle Swarm : Simpler, Maybe Better". IEEE Trans. Evolutionary Computation, Vol. 8, No. 3, pp. 204–210, 2004.
- [75] R. Mendes, J. Kennedy, and J. Neves. "Watch thy neighbor or how the swarm can learn from its environment". In : Proceedings of the 2003 IEEE Swarm Intelligence Symposium, pp. 88–94, Indianapolis, Indiana, USA, 2003.
- [76] U. K. Chakraborty, A. Konar, and S. Das. "Differential Evolution with Local Neighborhood". pp. 2042–2049, IEEE Press, Vancouver, BC, Canada, July 2006.
- [77] R. C. Eberhart and Y. Shi. "Tracking and optimizing dynamic systems with particle swarms". In : Proceedings of the 2001 IEEE Congress on Evolutionary Computation, pp. 94–100, IEEE Press, Piscataway, NJ, 2001.