

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



*Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté de Génie Electrique et d'Informatique
Département de l'Electrotechnique*



MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME D'INGENIEUR D'ETAT EN ELECTROTECHNIQUE

OPTION : RESEAUX ELECTRIQUES

Thème

*Simulation d'un système hybride
photovoltaïque diesel totalement autonome*

Proposé par :
H.KAABECHE

Dirigé par :
OTMANE-CHERIF TAHAR

Etudié par :
TARIK MESSAOUDI
SAMIR DAHMANI
NADIA NEKMI

Promotion 2008

Remerciements

Ce travail doit énormément à notre promoteur Monsieur T. Otmane-Cherif, qui nous a constamment orienté et encouragé tout au long de ce travail. On lui adresse nos remerciements les plus chaleureux. On mesure la chance d'avoir bénéficié de sa compétence.

Nous sommes particulièrement sensibles aux soins qu'il a accordés à la correction de ce mémoire. On a beaucoup apprécié son soutien. Ses conseils ont été très enrichissants.

On tient à remercier très chaleureusement Monsieur H. Kaabeche pour son aide précieuse et sa participation au projet et les documents qu'il nous a mis à notre disposition.

Nos remerciements vont également à Mohamed et Ahmed pour leur aide précieuse.

Merci à l'ensemble des membres de jury qui nous font l'honneur d'évaluer et de juger notre travail, que nous espérons à la mesure de leur attente.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
CHAPITRE I :	
SITUATION ENERGETIQUE DANS LE MONDE ET EN ALGERIE	
Introduction.....	4
I.1 Le photovoltaïque en statistique.....	4
I.1.1 Le marché mondial par application.....	5
I.1.2 Puissance photovoltaïque installée dans l'Union Européenne.....	5
I.1.3 Production mondiale de cellules PV.....	6
I.1.4 Les principaux fabricants de cellules photovoltaïques.....	7
I.1.5 Classement mondial des centrales PV.....	8
I.2 Situation énergétique en Algérie.....	9
I.2.1 Importance de l'électrification solaire dans les zones isolées.....	9
I.2.2 Besoin Energétique des zones isolées.....	9
I.2.3 Relation de notre étude avec l'électrification rurale.....	10
I.2.4 Potentiel d'énergie solaire en Algérie.....	11
I.2.5 Actions entreprise dans le domaine de l'énergie solaire photovoltaïque en Algérie.....	12
I.2.6 Répartition des énergies renouvelables en Algérie.....	15
I.2.7 Les perspectives algériennes dans le domaine photovoltaïque.....	15
Conclusion.....	17
CHAPITRE II :	
LES COMPOSANTS D'UN SYSTEME HYBRIDE PHOTOVOLTAIQUE DIESEL	
Introduction.....	18
II.1 l'effet photovoltaïque et le rayonnement solaire.....	18
II.1.1 L'effet photovoltaïque.....	18
II.1.2 Le Rayonnement solaire.....	19
II.1.3 - Le nombre d'air mass.....	20
II.1.4 Mesure du rayonnement solaire.....	20
II.1.5 Orientation des modules.....	20
II.1.6 Choix de l'inclinaison des modules.....	21
II.1.7 Mesure du rayonnement solaire.....	22
II.2 La cellule photovoltaïque (photopile).....	23
II.2.1 Historique.....	23
II.2.2 Principe de fonctionnement.....	24
II.2.3 Les différents types de cellules solaires.....	25
II.2.4 Comparatif des différents types de cellules.....	27

II.2.5 Caractéristiques électriques de la cellule PV.....	28
II.3 le module photovoltaïque.....	40
II.4 Les panneaux photovoltaïques.....	47
II.4.1 Caractéristique courant-tension d'un panneau photovoltaïque.....	47
II.4.2 Caractéristiques puissance-tension d'un panneau photovoltaïque.....	48
II.5 Installation des panneaux.....	49
II.6 Champs de modules photovoltaïques.....	50
II.7 Les batteries.....	51
II.7.1 Types de batteries.....	51
II.7.2 Caractéristiques des batteries.....	52
II.7.3 Différent types de batteries utilisable pour les applications PV.....	53
II.7.5 Installation des éléments de la batterie.....	54
II.7.6 Aspect extérieur.....	54
II.7.7 Connexion.....	54
II.7.8 Mise en service.....	55
II.8 Onduleur.....	55
II.9 Redresseur.....	56
II.10 Générateur diesel.....	56
II.10.1 Caractéristiques principales.....	56
II.10.2 Installation du générateur diésel	57
II.11 Le système de régulation.....	58
II.11.1 Rôle de la régulation dans un système photovoltaïque.....	58
II.11.2 Principe de fonctionnement des régulateurs.....	58
II .11.2.1 Information sur l'état de charge	58
II .11.2.2 Régulation de la décharge.....	59
II .11.2.3 Régulateur de la charge	59
II .11.2.4 Régulateur de charge série	59
II .11.2.5 Régulateur de charge à coupure	60
II .11.2.6 Régulateur de charge à découpage	60
II .11.2.7 Régulateur de charge série à coupure partielle.....	61
II .11.2.8 Régulateur de charge parallèle.....	61
II.11.2.9 Qualités d'un régulateur.....	62
II.12. configuration du système retenu pour notre étude.....	62
Conclusion.....	64

CHAPITRE III :

DIMENSIONNEMENT ET MODELISATION D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE

Introduction.....	65
III.1 Modélisation du module photovoltaïque.....	65
III.1.1 Equation de base	66
III.1.2 La Puissance	66
III.1.3 Modèle de LIU JORDAN généralisé	71
III.2 Modélisation du module photovoltaïque.....	73
III.2.1 Equation de base.....	73
III.3 Modélisation du champ photovoltaïque.....	74
III.4 Modélisation du système de stockage d'énergie.....	78
III.4.1 Modèle de la capacité.....	79
III.4.2 Modèle de la tension.....	80
III.4.3 Modèle du rendement faradique.....	80
III.5 Dimensionnement de l'onduleur.....	82
III.6 Générateur diesel.....	83
III.6.1 Moteur diesel et régulateur de vitesse.....	83
III.6.1.1 Modèle simplifié de la machine synchrone.....	84
Conclusion.....	86

CHAPITRE IV :

SIMULATION DU SYSTEME

Introduction.....	87
IV.1 Définition du problème.....	87
IV.2 Données radiométriques.....	87
IV.3 Prédétermination du profil énergétique de la demande.....	89
IV.4 Présentation du programme de simulation.....	91
IV.4 Organigramme.....	92
IV.4.2 Présentation des menus et des fenêtres.....	95
Conclusion générale.....	106

Introduction générale

INTRODUCTION

Introduction générale

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. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. 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, c'est pour cela que plusieurs directives ont été adoptées pour la promotion de l'électricité produite à partir des sources d'énergies renouvelables.

Par énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau où encore de la biomasse. La combinaison de ces énergies avec des énergies fossiles nous donne des systèmes hybrides qui permettent d'optimiser au maximum la production d'électricité, aussi bien du point de vu technique qu'économique.

Parmi les systèmes hybrides les plus prometteurs, il y a les systèmes hybrides photovoltaïque diesel. Ils sont souvent utilisés pour les régions isolées où éloignées, car le prix d'extension du réseau électrique s'avère excessif et le surcoût de l'approvisionnement en combustible augmente radicalement avec l'isolement.

Les Systèmes d'énergies hybrides sont généralement conçus pour répondre à un besoin énergétique allant du simple éclairage jusqu'à l'electrification complète des villages où de petites îles.

Dans ce mémoire on va décrire la méthode de développement d'un programme de simulation et de dimensionnement d'une installation d'un système hybride photovoltaïque diesel totalement autonome à travers une maîtrise de leur gestion et leur fonctionnalité est par conséquent une meilleure économie d'énergie. ce mémoire se compose en quatre chapitres ; le

premier présente la situation énergétique dans le monde et en Algérie, Le deuxième chapitre sera consacré aux différents composants d'un système hybride photovoltaïque diesel, Le troisième chapitre présente l'aspect théorique de la modélisation, et les différents modèles mathématiques implémentés, et en fin le quatrième et dernier chapitre donne la description détaillée du programme, son fonctionnement et la fonctionnalité de chaque une de ses fenêtres.

Chapitre I : La situation énergétique dans le monde et en Algérie.

Introduction

La plupart de l'électricité produite dans le monde (82 %), provient de la décomposition de combustibles fossiles (pétrole, charbon ou gaz naturel) ou de combustibles nucléaires. Bien que le gisement planétaire des combustibles fossiles soit très large, il est néanmoins limité. De plus, leur renouvellement n'est pas observable à l'échelle temporelle de l'homme. L'impact environnemental de ces modes de production d'électricité est notable, comme la production de gaz à effet de serre tel que le gaz carbonique (CO₂) ou de déchets radioactifs.

Le concept d'électricité décentralisée, c'est à dire production de l'électricité sur le lieu même de son utilisation, à encouragé le développement des moyens de production d'origine renouvelable.

La tendance actuelle montre que l'intégration de ce type de ressources dans les systèmes électriques isolés se fait en association avec l'utilisation des ressources conventionnelles, tels que les générateurs diesel. Enfin, l'ajout d'un dispositif de stockage d'énergie est parfois nécessaire pour assurer la continuité de la fourniture électrique à l'utilisateur, quand la ressource renouvelable ne peut le faire.

I.1 Le photovoltaïque en statistique

I.1.1 Le marché mondial par application [1]

Application	Marché en 2004 En MW _c	Croissance par rapport A 2003
Electrification des produits	70	+9%
Communications	80	+9%
Raccord au réseau	630	+59%

Tableau I.1: le marché mondial par application.

Le marché mondial de l'énergie photovoltaïque est en nette croissance. Les centrales photovoltaïques sont de plus en plus raccordées au réseau dans les pays industrialisés dû au pourcentage élevé d'électrification et au bénéfice mutuel que peut en tirer le propriétaire de la centrale.

I.1.2 Puissance photovoltaïque installée dans l'Union Européenne [1]

pays	Marchés-en 2004	Marchés-en 2005	Puissances cumulées	Puissance installée par habitant
Allemagne	503	603	1537	18,6

Espagne	10,6	20,2	57,7	1,4
France	5,2	6,4	32,7	0,5
Italie	5	5	36	0,6
Royaume-Uni	2,3	2,3	10,7	0,2
Autriche	2,3	2,2	21,4	2,7
Pays-Bas	5,7	2,1	51,2	3,1
Grèce	1,3	0,9	5,4	0,5

Tableau I.2: puissance PV installée dans l'union européenne.

Ce tableau nous renseigne sur l'intérêt porté au photovoltaïque par les différents pays de l'union européenne. L'Allemagne avec ses 1537 MWc cumulée fin 2005 prend largement le dessus sur les autres pays et elle continue à progresser en installant 100 MWc 2005. En deuxième position vient l'Espagne avec 57.7MWc cumulée, qui continue son évolution dans le domaine avec 20MWc installée en 2005 contre 10MWc en 2004, ensuite vient l'Italie la France, et le Royaume-Uni avec respectivement 36.7MWc, 32MWc, 10.7MWc. Cependant d'autres pays affichent une régression de leur puissance installée en 2005. C'est l'exemple de l'Autriche, les Pays-Bas et la Grèce.

I.1.3 Production mondiale de cellules PV [1]

Répartition géographique	Production 2005 en MW _c
Japon	48%
Europe	26%
Chine et Taiwan	12%
Etats-Unis	9%
Reste du monde	5%
Monde	100%

Tableau I.3: production mondiale des cellules PV.

Le Japon est le plus grand producteur des cellules PV avec 48% de la production mondiale, la raison principale de ce succès est une action d'incitation du pouvoir pour l'installation des systèmes PV avec un soutien de la recherche scientifique.

La puissance installée au Japon est de 1.432 MW. L'Europe arrive avec 26%, l'Allemagne y joue un rôle prépondérant puisqu'elle est le deuxième marché du secteur de l'énergie photovoltaïque. La chine et le Taiwan prennent la troisième place avec 12%. La chine semble être un marché d'avenir puisqu'elle se dit prête à investir 1.4 milliard d'euros sur ce secteur sur les 5 ans à venir. Les Etas Unis représentent 9% de la production mondiale et enfin le reste du monde avec 5%.

I.1.4 Les principaux fabricants de cellules photovoltaïques

fabricants	Production en MW _c	Part du marché
	En 2005	
Sharpe	428	24,8%
Q-cells	160	9,3%
Kyocera	142	8,2%
Sanyo	125	7,2%

Mitsubishi electric	100	5,8%
Schott solar	95	5,5%
Bp solar	90	5,2%
Suntech	80	4,6%
Motech	60	3,5%
Shell solar	59	3,4%
Isofoton	53	3,1%
AUTRES	297	17,2%
TOTAL	1727	100%

Tableau I.4 : Le Marché mondial par application.

La production est dominée par les compagnies japonaises qui se partagent plus de 48% du marché , suivi par les compagnies européennes comme Q-cells, schott solar, shell solar (Allemagne) , Isofoton (Espagne) , etc... avec 26%, les compagnies chinoises (suntech)et taïwanaise (motech) ont 12% du marché mondial et les compagnies américaines (BP solar,spectrolab) avec 9%.

I.1.5 Classement mondial des centrales PV

Puissance (MW crête)	localisation	description	Production (MW/an)
62 MW	Moura, Portugal	350 000 Modules	88 GWh, sera en service en 2009
40 MW	Brandis, Allemagne	400 000 m², 550 000	40 GWh, 1ere centrale au monde en modules a couches minces (CIS),

		Modules CIS	entraînant une baisse significative des prix , prévu en 2009, voir lien
18 MW	Las Vegas, Etas unis	Non précisé	Prévu en 2007
14 MW	Murcia, Espagne	Na	20 000 GWh fin 2007)
12MW	Bavaria Solarpark, Allemagne	Passée à 12 MW en 2006	12 GWh
11MW	Serpa, Portugal	52 000 modules	Entre en service en 2007 communiqué de presse
6.3MW	Muhlhausen, Allemagne	57 600 modules	6 750 GWh
5MW	Burstadt, Allemagne	30 000 modules	4 200 GWh
5MW	Espenhain, Allemagne	33 500 modules	5 000 GWh
4.59MW	Springeville, Arizona, USA	34 980 modules	7 750 GWh
4MW	Geiseltalsee, Merseburg, Allemagne	25 000 modules	3 400 GWh
4MW	Gottelborne, Allemagne	50 000 modules (prévus)	8 200 GWh
4MW	Hemau, Allemagne	32 740 modules	3 900 GWh
3.9MW	Rancho Seco, californi, USA	n.a.	n.a.
3.3MW	Dingolfing, Allemagne	Non précises	3 050 GWh

I.2 Situation énergétique en Algérie

I.2.1 Importance de l'électrification solaire dans les zones isolées

La majorité de la population de l'Algérie est surtout concentrée dans le nord, où un réseau électrique interconnecté très diversifié existe, il faut néanmoins satisfaire les besoins en énergie électrique de la population et de l'activité économique dans les régions du sud, qui sont principalement alimentées en électricité d'origine diesel dans la plus part des centrales.

Les contraintes majeures liées à cette production d'électricité d'origine diesel est l'éloignement des lieux d'approvisionnement en combustible et des ateliers de maintenance, en effet des études technico-économiques comparatives entre les systèmes hybrides (photovoltaïque diesel) on affirmé que la compétitivité des centrales photovoltaïques autonomes est largement justifiée, et celles-ci peuvent contribuer à résoudre ce problème.

L'intérêt que porte l'Algérie aux énergies renouvelables est grandement motivé par la disponibilité de cette source, le potentiel est important, particulièrement le solaire, notre pays est considéré comme le premier gisement en la matière en méditerranée, un atout qui constitue une sécurité à long terme.

I .2.2 Besoin Energétique des zones isolées

Dans les zones isolées, les besoins énergétiques peuvent être classés en trois groupes :

a/ Les besoins énergétiques pour le développement et la modernisation de l'agriculture, il s'agit principalement de :

- la mécanisation ;
- l'irrigation (arrosage de grandes surfaces agricoles) ;
- la conservation des récoltes ;
- la transformation du produit agricole (atelier agro-alimentaire ...etc.) ;
- l'artisanat.

b/ Les besoins énergétiques pour l'amélioration des conditions sanitaire de la population :

- l'eau potable (alimentation, dessalement,...etc.) ;
- la conservation des vaccins et médicaments (production du froid...etc.).

c/ Les besoins énergétiques pour l'amélioration de la vie social, entre autre :

- l'éclairage (publique, domestique) ;
- les équipements domestiques ;
- la climatisation ;
- les télécommunications ;
- l'éducation.

Actuellement tous ces besoins énergétiques ne sont pas encore totalement satisfaits. Malgré les efforts déployés par les collectivités locales.

I.2.3 Relation de notre étude avec l'électrification rurale

L'alimentation en électricité pour un site isolé est un problème difficile à résoudre, du fait qu'il n'est pas toujours possible :

- de réaliser un raccordement avec un réseau électrique existant ;
- d'y utiliser, dans de bonnes conditions un générateur diesel.

En effet dans le premier cas, il arrive souvent que l'opération ne soit pas justifiée économiquement ; et surtout lorsqu'il s'agit d'une région éloignée des réseaux ou d'une zone isolée a faible concentration de population.

Concernant l'utilisation d'un générateur diesel, elle peut s'avérer également très onéreuse ; car dans le cas d'une zone enclavée, aux conditions d'accès difficiles, les frais d'exploitation de ce dernier deviennent rapidement excessifs.

Devant de telles situations, il est indispensable d'étudier toutes les possibilités. L'utilisation (en combinaison éventuellement) des autres sources d'énergie jusqu'à en trouver une qui s'accommode pour des raisons spécifiquement technico-économiques, dont le système hybride (photovoltaïque-diesel) qui est l'objet de notre étude.

I.2.4 Potentiel d'énergie solaire en Algérie

De par sa situation géographique, l'Algérie dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde.

La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut atteindre les 3900 heures (hauts plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m^2 est de l'ordre de 5 KWh sur la majeure

partie du territoire national, soit près de 1700KWh/m²/an au Nord et 2263 kWh/m²/an au Sud du pays.

Potentiel solaire en Algérie [2]

Régions	Région côtière	Hauts Plateaux	Sahara
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Energie moyenne reçue (KWh/m ² /an)	1700	1900	2650

Ce gisement solaire dépasse les 5 milliards de GWh / an.

A signaler que le potentiel solaire algérien reste le plus important sur tout le bassin méditerranéen avec 169 440 TWh/an, soit 5000 fois la consommation algérienne en électricité et 60 fois la consommation de l'Europe des 15 (estimée à 3000 TWh/an).

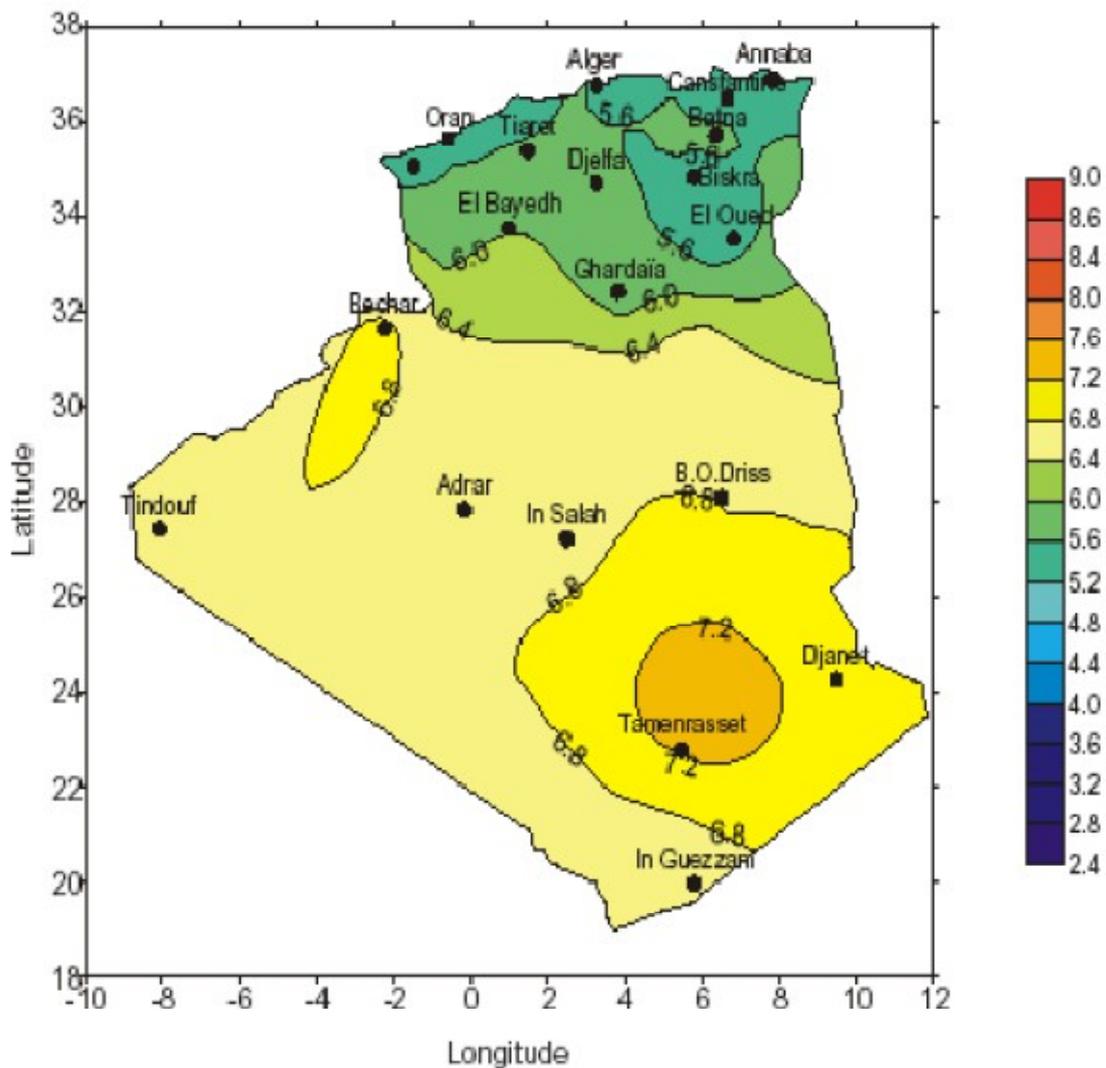


Figure I.1 : Atlas solaire Algérien [3].

I.2.5 Actions entreprise dans le domaine de l'énergie solaire photovoltaïque en Algérie

Dans le cadre du développement des énergies (solaire photovoltaïque), plusieurs projets et programmes solaires ont été initiés et développés par la Division Energie Solaire Photovoltaïque du Centre de Développement des Energies Renouvelables, pour de nombreuses applications dans le but de répondre aux besoins énergétiques des citoyens et des usagers vivants dans les zones isolées où l'énergie conventionnelle n'est point disponible, à savoir : électrification rurale, éclairage public et domestique, pompage de l'eau, production

de froid, balisage aérien, terrestre et maritime, dessalement des eaux, télécommunications [26].

➤ ***Programme Solaire de Batna***

- Etude, fourniture et installation de 08 systèmes photovoltaïques, destinées à l'électrification des logements d'enseignants au niveau des écoles inscrites dans le programme de la Wilaya. La puissance installée totale a été de 10 kWc.
- Etude et dimensionnement, fourniture des équipements et installation de la mini-centrale photovoltaïque de 5 kWc sous 96 volts avec un stockage électrochimique de 2400 Ah à Iguelfen (W. Batna).
- Etude et dimensionnement, fourniture et installation de 03 mini centrales de 2,5 kWc sous 48 volts avec un stockage d'énergie par le parc de batterie de 1200 Ah pour trois sites ponctuels.
- Installation de 5 conservateurs médicaux photovoltaïques (60 litres), développés au Centre, dans des dispensaires de campagne [4].

➤ ***Programme Solaire d'Oum-El-Bouaghi***

- Suivi du programme relatif à l'électrification de deux (02) sites à l'aide de systèmes photovoltaïques de puissance variant de 1 à 1,5 kWc.
- Installation de cinq systèmes de pompage sur divers sites de la wilaya [5].

➤ ***Programme solaire de Tiaret***

La Wilaya a sollicité le CDER pour la fourniture, et l'installation de systèmes photovoltaïques pour des besoins de l'électrification rurale, du pompage solaire, et du froid solaire. Des visites de sites ont été alors effectuées pour l'implantation future de ces équipements solaires (kits d'éclairage, pompes solaires et conservateurs médicaux). Les équipements ont été fournis et installés. La division a formé deux techniciens de Tiaret pour l'installation de ces équipements [5].

➤ ***Marché Ministère des PTT/CDER***

- Elaboration d'un marché pour la fourniture, l'installation et la mise en service des équipements solaires destinés à l'alimentation en énergie de huit relais de téléphonie

rurale dans la Wilaya de Tipaza (puissance demandée 160 watt permanent sous 48 volts – autonomie de la batterie de 10 jours).

- Suivi du programme Energie Solaire du Ministère des PTT, installations de générateurs solaires pour les faisceaux hertziens dans les wilayas du sud (Gassi-Touil, Aoulef, Reggane, Tamanrasset, Illizi, Djanet,...).
- Etablissement de plusieurs projets de démonstration relatifs à la fourniture et à l'installation des générateurs photovoltaïques pour l'alimentation électrique des relais de faisceaux hertziens pour le compte du MPTT sur de nombreux sites du territoire [5].

➤ **Marché ENESA/CDER**

- Etablissement du marché pour la fourniture et l'installation des équipements solaires destinées à l'alimentation en énergie de 15 radio-balises implantées au niveau des aéroports du territoire national (Balisage Aérien et Signalisation).
- Suivi et mise en fonctionnement de ces systèmes photovoltaïques à courant continu sur site [5].

➤ **Marché SONATRACH/CDER**

Etablissement d'un marché relatif à la fourniture, l'installation et la mise en service de 10 systèmes PV de puissance de 2 kW destinés à l'alimentation des relais hertziens situés sur le prolongement des pipes-lines dans les Wilaya d'Ouargla et d'Illizi. La puissance-crête installée est de 20 kWc.

Les éléments de la batterie (2V-1200Ah) sont placés dans des enceintes enterrées. Ces systèmes sont en fonctionnement depuis plus de 6 années [5].



Figure I.2 : Alimentation électro-solaire des relais hertziens.

I.2.6 Répartition des énergies renouvelables en Algérie [6]

<i>Applications</i>	<i>puissance installée(KWc)</i>
<i>Electrification</i>	1353
<i>Pompage</i>	228
<i>Eclairage public</i>	48
<i>Télécommunication</i>	498
<i>Autre</i>	166
<i>TOTAL</i>	2353

I.2.7 Les perspectives algériennes dans le domaine photovoltaïque

Le Sahara représente potentiellement l'un des plus importants gisements d'énergie solaire disponibles sur notre planète, La mise en valeur de cette immense ressource potentielle naturelle non polluante constitue un enjeu majeur pour le 21ème siècle et pour l'avenir énergétique de l'humanité toute entière. (NEPAD), ainsi les ambitions algériennes dans ce domaine sont comme suit :

➤ ***Le programme «EL AMEL »***

- Pompage solaire ;
- Electrification rurale isolée ;
- Production de froid solaire ;
- Chauffage solaire de l'eau sanitaire ;
- Connections aux réseaux (solaire et éolien) ;
- Développement des serres agricoles ;
- Développement de bioclimatique [6].

➤ ***Central électrique solaire/gaz de HASSI R'MEL***

A l'horizon 2015, l'Algérie ambitionne de porter à 6% la part des énergies renouvelables dans le bilan de la production électrique. Parmi les principaux projets figure cette centrale hybride solaire/gaz de 150 MW, dont 25 MW en solaire. Le projet va être réalisé avec la compagnie espagnole Abener Energia, spécialiste de la cogénération [2].

➤ ***L'Algérie pourrait exporter de l'énergie solaire***

L'Algérie pourrait commencer à exporter de l'énergie solaire en 2013 vers l'Allemagne selon Tewfik Hasni, le président de l'agence pour l'énergie renouvelable.

Cette agence attend le feu vert de l'état pour la construction d'une liaison avec l'Allemagne de 3000 Km. Cette interconnexion permettra au départ le transport de 800 à 1000Megawats par an d'énergie solaire pour aller jusqu'à 6000 mégawats en 2018.

Conclusion

Les espoirs initiaux suscités par les nombreux avantages potentiels de cette nouvelle source d'énergie électrique seront accomplis après avoir réglé les nombreuses difficultés techniques et surtout amélioré les conditions économiques. En effet, malgré des progrès significatifs, le coût du kilowattheure produit reste souvent beaucoup plus élevé qu'avec les technologies lourdes classiques. Aussi, l'ensemble des installations photovoltaïques mondiales ne représente que 100 MW installées à comparer aux 1300 MW d'une seule tranche de centrale nucléaire.

Le photovoltaïque solaire est la plus jeune des énergies renouvelables, son industrialisation à une échelle significative n'a qu'une vingtaine d'années. Il faut donc stimuler son marché pour que l'industrie devienne compétitive, grâce à l'effet des grandes séries, bien connu pour la plupart des produits industriels, où les progrès technologiques et le développement des marchés se cumulent pour faire baisser les prix.

Chapitre II : Les composants d'un système hybride photovoltaïque diesel.

Introduction

Ce chapitre sera consacré aux principes généraux de la conversion photovoltaïque, les cellules solaires, et les différents organes constituant un système photovoltaïque. L'influence du rayonnement, de la température et les résistances de contacts sur les performances des générateurs photovoltaïques (GPV) sont aussi envisagés.

Vue l'importance du système de stockage dans les installations photovoltaïques. On décrira aussi le principe de fonctionnement des batteries solaires et les différents types utilisés dans les installations PV.

On verra aussi les caractéristiques de l'appoint (générateur diesel), qui a une très grande importance dans une installation PV non raccordée au réseau externe.

On terminera par la description du système de régulation, son rôle ainsi que sont principe de fonctionnement, et les différents systèmes utilisés dans une installation PV.

II.1 L'effet photovoltaïque et le rayonnement solaire

II .1.1 L'effet photovoltaïque

La conversion photovoltaïque se définit par la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie de type continu directement utilisable.

Lors de l'absorption de la lumière, la génération des paires électron-trou ainsi que la séparation de ces porteurs de charges constituent un processus important non seulement pour les mesures et la détection de lumière (photodétecteurs) mais aussi pour la conversion de la lumière et énergie chimique (photosynthèse) et en énergie électrique (cellules solaires).

II.1.2 Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire correspond approximativement à celui d'un corps noir à 5780k. En traversant les différentes couches de l'atmosphère, certaines longueurs d'onde sont absorbées par des composants comme l'ozone (absorption des rayons UV) ou la vapeur d'eau (absorption des rayons infrarouges).

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns (μm). La figure (II.1), représente la variation de la répartition spectrale énergétique. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- 9% dans la bande des ultraviolets ($<0,4 \mu\text{m}$) ;
- 47% dans la bande visible ($0,4 \text{ à } 0,8 \mu\text{m}$) ;
- 44% dans la bande des infrarouges ($>0,8 \mu\text{m}$).

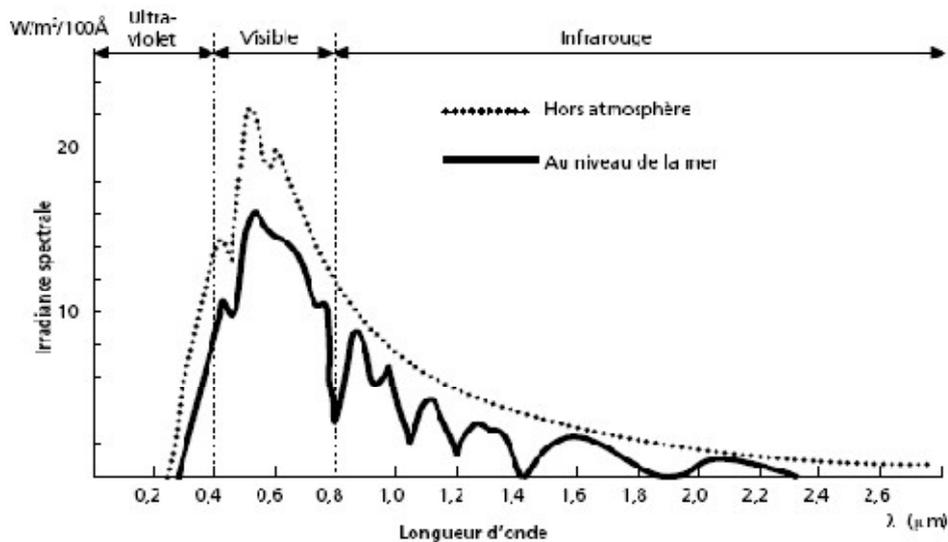


Figure II.1 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.

Les rayonnements solaires peuvent être dévisés en trois types :

- **Le rayonnement direct** est le rayonnement reçu directement du soleil.
- **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.
- **Le rayonnement solaire réfléchi** est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface [7], [8].

II.1.3 - Le nombre d'air mass

Vu les différentes couches atmosphériques existantes, la valeur de l'éclairement reçu sur terre est différente de celle émise par le soleil. Cette valeur dépend de l'épaisseur d'air traversée et donc de la hauteur du soleil.

La valeur de cet éclairement est souvent exprimée en termes d'AMX qui désigne le nombre d'air-masse ou masse atmosphérique.

L'éclairement reçu au dessus de l'atmosphère est désigné par le spectre AMO (correspond à une puissance de $1400\text{W}/\text{m}^2$), par contre celui reçu au niveau de la mer, par temps clair, et pour un rayonnement normal (soleil au zénith) correspond à air-masse 1, il est de l'ordre de $1000\text{W}/\text{m}^2$ à $1200\text{W}/\text{m}^2$ [9].

II.1.4 Mesure du rayonnement solaire

L'ensoleillement correspond à l'intensité du rayonnement solaire reçu sur un plan à un moment donné. Il s'exprime habituellement en watts par mètres carré (W/m^2). Comme on l'explique à la ressource solaire, l'ensoleillement varie de zéro, au lever du soleil, à sa valeur maximale, typiquement au midi solaire.

L'ensoleillement peut également exprimer la quantité d'énergie solaire captée sur un plan pendant un intervalle déterminé. Il s'exprime en kilowattheure par mètre carré (KWh/m^2).

II.1.5 Orientation des modules

L'absorption atmosphérique est plus faible lorsque le soleil se trouve à son point le plus haut dans le ciel, c'est-à-dire plein sud dans l'hémisphère nord et plein nord dans l'hémisphère sud. En effet, la distance que doit parcourir le rayonnement dans l'atmosphère

est plus courte lorsque le soleil est directement au-dessus de l'endroit visé. C'est le midi solaire, moment où le rayonnement solaire direct est le plus intense. Comme le soleil est plus haut et que les journées sont plus longues en été, la quantité totale d'énergie reçue sur un plan horizontal est plus grande qu'en hiver.

La latitude a aussi un effet important : les journées estivales s'allongent à mesure qu'on s'éloigne de l'équateur, et le soleil est bas au midi solaire. Les journées d'hiver sont également plus courtes, et le soleil encore plus bas que l'équateur. Autrement dit, l'intensité maximale et la quantité totale de rayonnement solaire sur un plan horizontal diminuent à mesure qu'augmente la latitude.

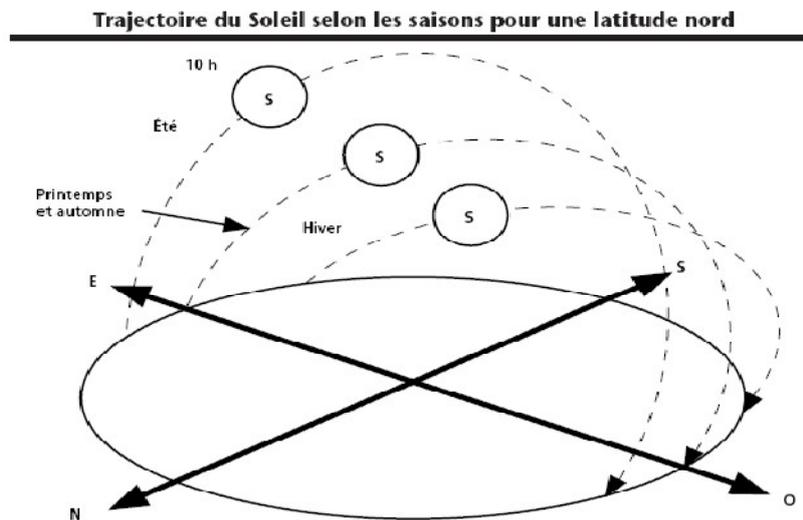


Figure II.2 : Trajectoire du Soleil selon les saisons pour une latitude nord.

II.1.6 Choix de l'inclinaison des modules

Pour que les modules produisent un maximum d'énergie, il faut que leur surface soit perpendiculaire aux rayons solaires. On doit donc incliner les modules pour qu'ils soient face au soleil. La valeur d'inclinaison correspond à l'angle que font les modules avec l'horizontale.

Comme il est difficile de modifier plusieurs fois dans l'année l'inclinaison des modules, on choisit généralement une valeur moyenne sur l'année [10].

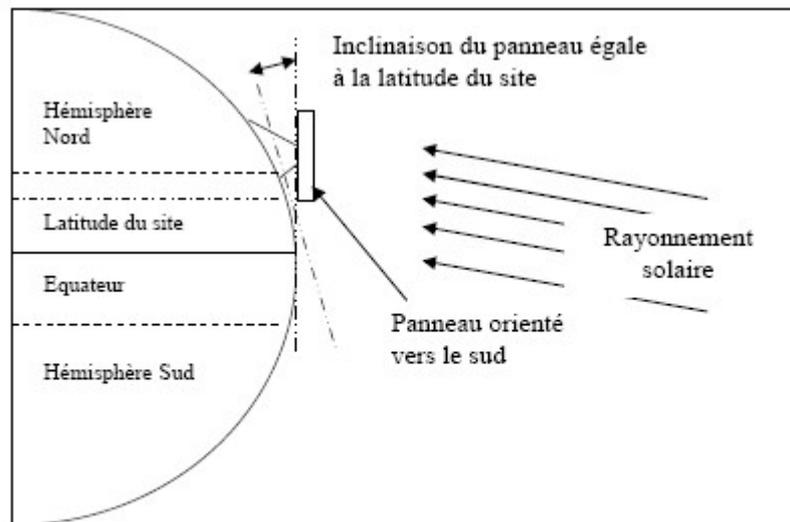


Figure II. 3 comment incliner le panneau solaire.

L'inclinaison optimale (par rapport à l'horizontale) peut se résumer sur le tableau suivant :

Pour une utilisation durant toute l'année	
Latitude φ	inclinaison α
$\varphi < 10^\circ$	$\alpha = 10^\circ$
$10^\circ < \varphi < 30^\circ$	$\alpha = \varphi$
$30^\circ < \varphi < 40^\circ$	$\alpha = \varphi + 10^\circ$
$\varphi > 40^\circ$	$\alpha = \varphi + 15^\circ$

II.2 La cellule photovoltaïque (photopile)

II.2.1 Historique

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

- 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un Article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- 1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

La première *cellule photovoltaïque (ou photopile)* a été développée aux États-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la Photosensibilité du silicium pouvait être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé [11].

II.2.2 Principe de fonctionnement

Une cellule photovoltaïque est constituée de deux couches de silicium cristallin. Un constituant qui a la propriété d'être semi conducteur : les électrons sont liés aux atomes mais peuvent se détacher et donc circuler avec l'apport d'énergie lumineuse pour ensuite permettre le passage d'un courant comme dans un conducteur électrique.

Les atomes de silicium possèdent 4 électrons. Deux couches vont être dopées afin d'être polarisées. Pour rendre l'une des couches positive (couche P) on lui incorpore un certain nombre d'atomes de Bore ; celui-ci possède 1 électron de moins par rapport aux atomes de silicium (3 électrons). Pour rendre l'autre couche négative (couche N) on lui incorpore un certain nombre d'atomes de phosphore ; celui-ci possède quant à lui 1 électron de plus par rapport aux atomes de silicium (5 électrons). On crée ainsi une barrière de potentiel. Lorsque nous superposons les 2 types de couches, elles se neutralisent mutuellement jusqu'au point où se crée un champ électrique qui exerce une répulsion et qui maintient les différentes charges (+ et -) dans leurs champs respectifs. Les atomes de bores et de phosphore ne sont pas mobiles et définissent les deux couches, contrairement aux atomes de silicium.

Lorsque les photons ayant suffisamment d'énergie sont absorbés par ce semi-conducteur, ils produisent la rupture d'une liaison de valence (liaison entre les électrons et l'atome) pour chacun des atomes de silicium, les atomes de silicium libèrent donc chacun un électron. C'est ce que l'on appelle l'effet voltaïque : c'est la différence de potentiel entre ces deux couches. Grâce au champ électrique de répulsion, cet électron ira inévitablement du côté négatif et les atomes de silicium ayant perdu un électron (Si^+) du côté positif. En reliant ces couches on obtient un mouvement des électrons qui passent d'une couche à l'autre et créent ainsi un courant électrique.

Après utilisation de ce courant électrique, les électrons « dépourvus d'énergie » se relient aux atomes de silicium ayant perdu un électron (Si^+) [12].

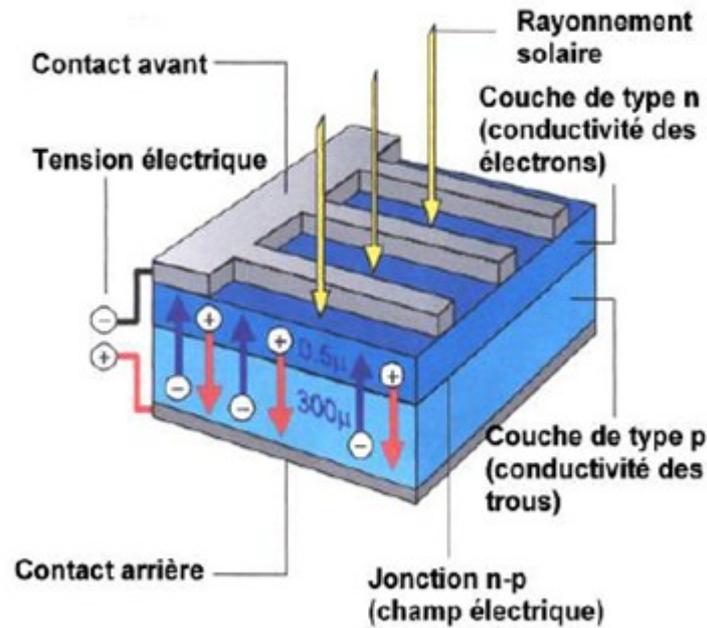


Figure II.2 : Schéma de principe d'une Cellule Photovoltaïque.

Remarque : La cellule individuelle ne délivre environ qu'une tension de 0.5 Volt et ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant pour une même tension.

II.2.3 Les différents types de cellules solaires

- **Les cellules monocristallines :** ce sont les photopiles de la première génération, elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Les cellules sont rondes ou presque carrées et, vues de près, elles ont une couleur uniforme. Elles ont un rendement de 12 à 16%, mais la méthode de production est laborieuse [13].

- **cellules polycristallines** : elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes).
Elles ont un rendement de 11 à 13%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines [13].

- **Les cellules amorphes** : ont un coût de production bien plus bas, mais malheureusement leur rendement n'est que 6 à 10% actuellement. Cette technologie permet d'utiliser des couches très minces de silicium qui sont appliquées sur du verre, du plastique souple ou du métal, par un procédé de vaporisation sous vide, Elles sont utilisées couramment dans les produits de petite consommation tel que les calculatrices solaires ou encore les montres [13].

II.2.4 Comparatif des différents types de cellules [11]

Matériau	Rendement	Longévité	caractéristiques	Principales utilisations
Silicium mono cristallin	12 à 18% (24,7% en laboratoire)	20 à 30 ans	* Très performant * Stabilité de production d'W * Méthode de production coûteuse et laborieuse.	Aérospatiale, modules pour toits, façades,...
Silicium poly cristallin	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 à 30 ans	* Adapté à la production à grande échelle. * Stabilité de production d'W. Plus de 50% du marché mondial.	Modules pour toits, façades, générateurs...
Amorphe	5 à 8% (13% en laboratoire)		* Peut fonctionner sous la Lumière fluorescente. * Fonctionnement si faible luminosité. * Fonctionnement par temps couvert. * Fonctionnement si ombrage partiel * La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment
Composite mono cristallin (GaAs)	18 à 20% (27.5% en laboratoire)		* Lourd, fissure facilement	Systèmes de concentrateurs Aérospatiale (satellites)
Composite poly cristallin (CdS,	8% (16% en laboratoire)		* Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment

CdTe,
CuInGaSe₂,
etc.)

II.2.5 Caractéristiques électriques de la cellule PV

Une cellule photovoltaïque est caractérisée par un rendement de conversion η , une Tension à circuit ouvert V_{OC} , un courant de court circuit I_{CC} et un facteur de forme ff . Les caractéristiques courant-tension sont utilisées pour déterminer ces paramètres.

- *schéma équivalent :*

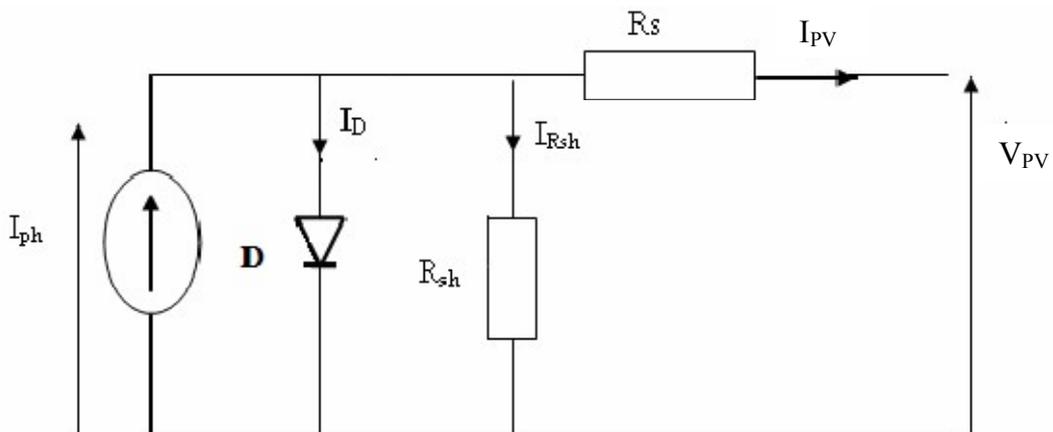


Figure II.3 : schéma équivalent d'une cellule PV.

- ✓ R_s est une résistance série liée à la résistivité volumique et à l'impédance des électrodes et des matériaux. La pente de la courbe courant-tension au point V_{oc} représente l'inverse de la résistance série ($1/R_s$).
- ✓ R_{sh} est une résistance shunt liée aux effets de bord et aux recombinaisons volumiques. La pente de la courbe courant tension au point I_{cc} représente l'inverse de la résistance shunt ($1/R_{sh}$).

En général, la valeur de R_{sh} est plus grande que R_s d'au moins un ordre de grandeur.

Pour minimiser les pertes, il faut diminuer R_s et augmenter R_{sh} . Le cas idéal est représenté par R_{sh} égale à l'infini et R_s égale à zéro.

- **Caractéristique courant tension :**

La caractéristique courant-tension, illustrée dans la figure (II.4), décrit le comportement de la cellule photovoltaïque sous l'influence des conditions météorologiques (niveau d'éclairement et température ambiante) [10].

La courbe de la cellule solaire $I=f(V)$ passe par trois points importants qui sont :

- Le courant de court-circuit I_{cc} en M ;
- La tension de circuit ouvert V_{oc} en S ;
- La puissance maximale en A.

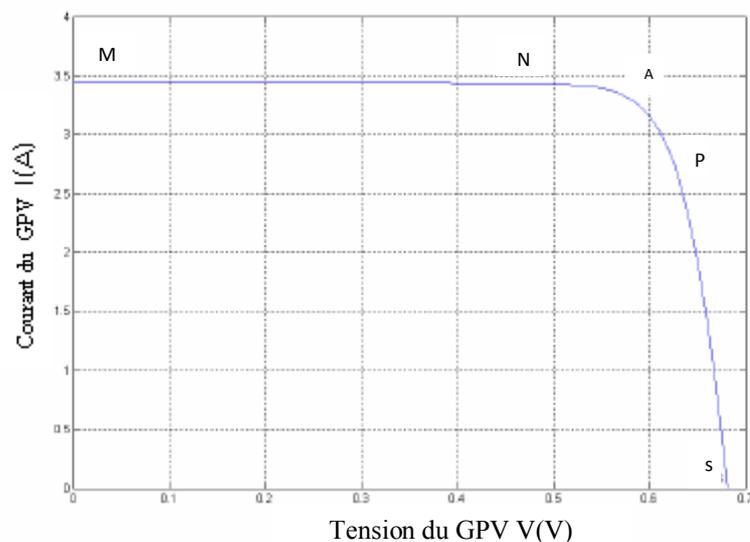


Figure II.4 : Caractéristique courant-tension d'une cellule photovoltaïque.

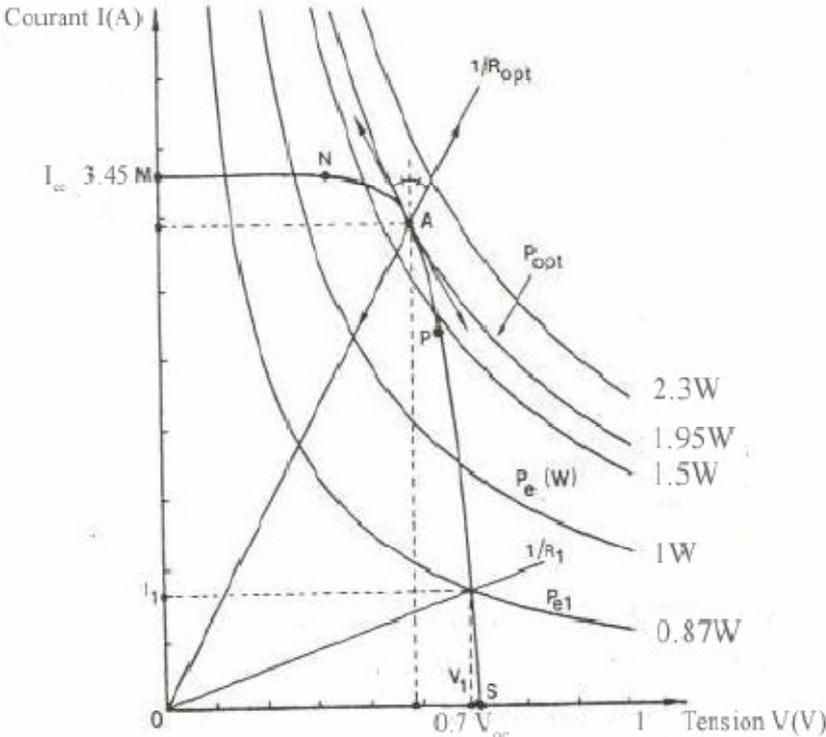


Figure II.5 : Courbe d'équipuissance et droite de charge.

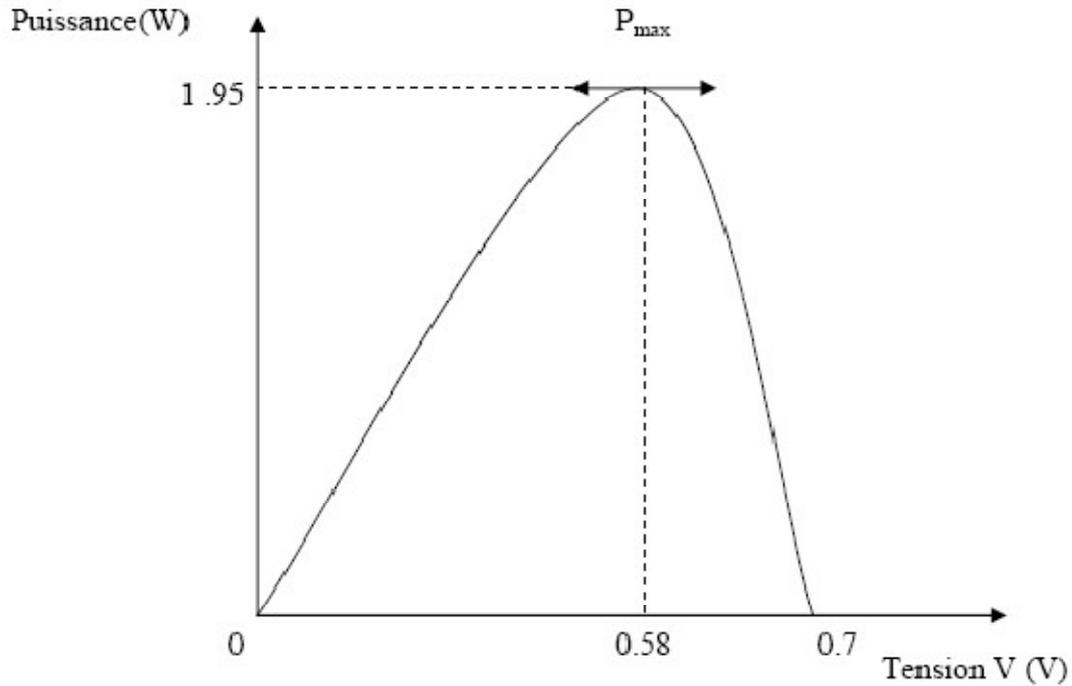


Figure II.6 : Courbe caractéristique P- V.

La figure (II.4) montre bien qu'une cellule photovoltaïque ne peut être assimilée à aucun générateur classique (générateur de courant ou générateur de tension).

En effet, sa caractéristique se divise en trois parties :

- la zone MN où la cellule se comporte comme un générateur de courant I_{cc} Proportionnel à l'éclairement ;
- la zone PS où la cellule se comporte comme un générateur de tension V_{oc} ;
- la zone NP où l'impédance interne du générateur varie rapidement [10].

• **Courant de court-circuit, I_{CC} :**

Le courant de court-circuit I_{cc} de la cellule photovoltaïque est exprimé par l'expression suivante, lorsque la tension est nulle ($V=0$) [9] :

$$I_{CC} = I_{ph} - I_{sat} \left(\exp \left(\frac{qR_s I_{cc}}{mK_B T} \right) - 1 \right) - \frac{R_s I_{cc}}{R_{sh}} \quad (\text{II.1})$$

I_{cc} : courant de court-circuit.

I_{ph} : courant photo-généré par le générateur solaire sous éclairage.

I_{sat} : courant de saturation.

R_s : résistance série du générateur solaire.

R_{sh} : résistance shunt du générateur solaire.

Pour la plus part des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme $I_{sat} \left(\exp \left(\frac{qR_s I_{cc}}{mK_B T} \right) - 1 \right)$ devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit est

$$\text{alors :} \quad I_{cc} \cong \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \quad (\text{II.2})$$

$$\text{On sait que } R_s \div R_{sh} \cong 0, \text{ ce qui donne : } I_{cc} = I_{ph} = K \cdot \phi \quad (\text{II.3})$$

- **Tension de circuit ouvert, V_{oc} :**

Dans le cas du circuit ouvert (point S de la figure (II.4)), la tension du circuit ouvert peut être exprimée analytiquement selon la formule suivante [9] :

$$0 = I_{ph} - I_{sat} \left(\exp \left(\frac{qR_s I_{cc}}{mK_B T} \right) - 1 \right) - \frac{V_{co}}{R_{sh}} \quad (\text{II.4})$$

Dans la plus part des cas, la résistance shunt est infinie, on obtient :

$$V_{co} \cong \frac{mK_B T}{q} \ln \left(1 + \frac{I_{ph}}{I_{sat}} \right) \quad (\text{II.5})$$

La tension de circuit ouvert V_{oc} correspond, en fait, à la chute de tension dans la jonction PN, lorsqu'elle est traversée par le photo-courant I_{ph} [10].

- **Influence de l'ensoleillement et de la température :**

Nous avons vu que le courant produit par la photopile (I_{ph}) est pratiquement proportionnel au flux lumineux (ϕ). Par contre, la tension (V) aux bornes de la jonction varie peu car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction N-P du matériau lui-même (pour le silicium monocristallin, elle est de 590 mV pour $T_j = 25C^\circ$). La tension de circuit ouvert ne diminuera que légèrement avec le flux lumineux. Ceci implique donc que [10] :

- La puissance optimale de la cellule (P_m) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement;
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension figure (II.7).

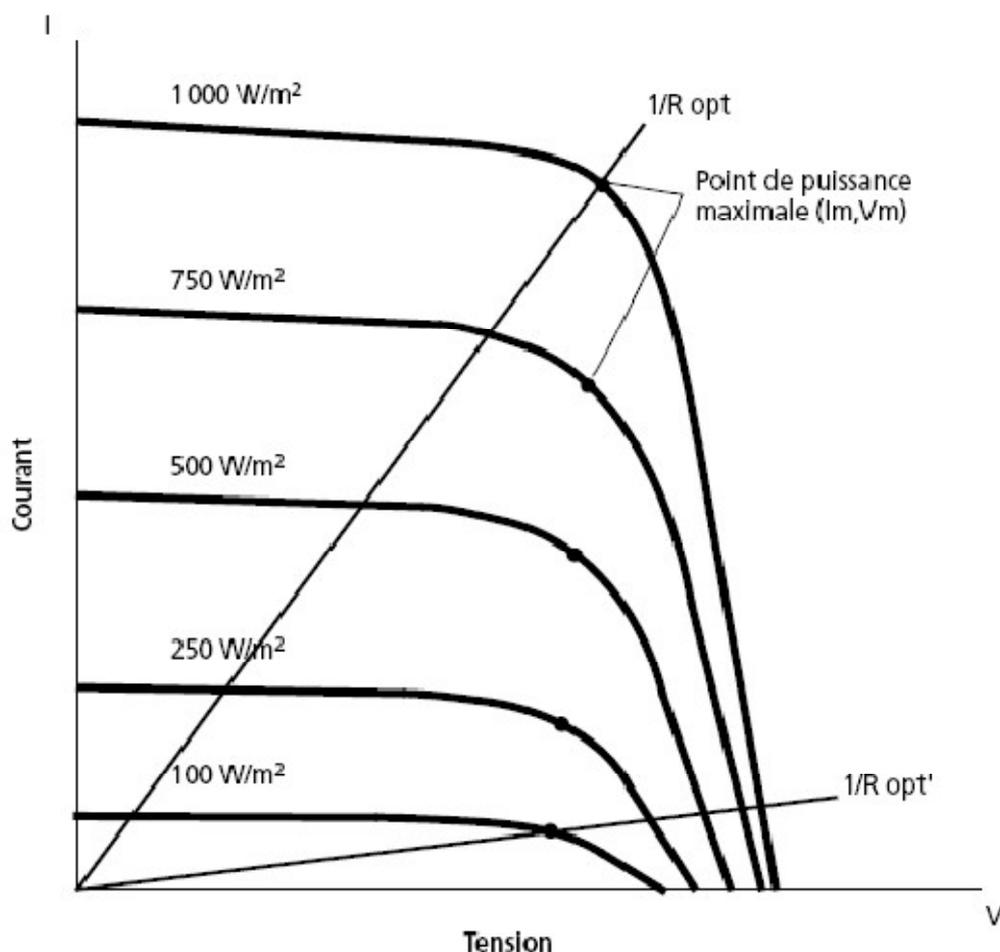


Figure II.7 : Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique courant-tension générateur photovoltaïque [7].

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant/tension d'un semi-conducteur (voir figure II.8). Pour le silicium, lorsque la température augmente, le courant augmente d'environ $0,025 \text{ mA/cm}^2/\text{°C}$ alors que la tension décroît de $2,2\text{mV}/\text{°C}/\text{cellule}$. Cela se traduit par une baisse de puissance d'environ $0,4\%/ \text{°C}$. Cette influence devra être prise en compte lors du dimensionnement du générateur photovoltaïque.

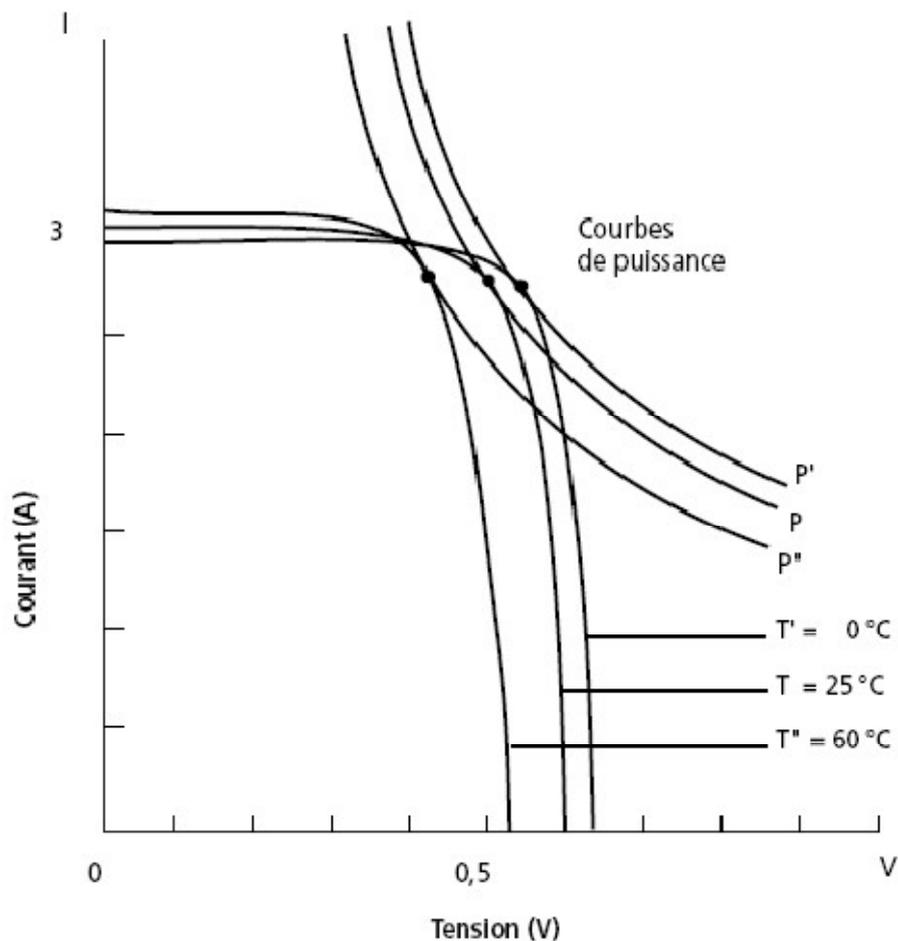


Figure II.8 : Influence de la température sur la caractéristique courant-tension d'un générateur photovoltaïque [7].

Une convention internationale définit la puissance d'une cellule en Watt crête. Le W_c (W_p en anglais) est la puissance optimale fournie par la photopile sous des conditions de mesures normalisées (cmn), c'est-à-dire pour un ensoleillement de 1kW/m^2 et pour une température de jonction de la cellule de $25\text{ }^\circ\text{C}$. Le rendement de conversion (efficacité) d'une cellule est le rapport entre la puissance électrique optimale (P_m) et la puissance solaire reçue à la température de référence. Ainsi, une simple cellule de silicium monocristallin ayant une surface de $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ aura une efficacité d'environ 14% et produira environ $1,4\text{ Wc}$ à $0,5\text{ volt}$.

- **Facteur de forme, ff :**

La puissance fournie au circuit extérieur par une cellule photovoltaïque sous éclairage dépend de la résistance de charge (résistance externe placée aux bornes de la cellule). Cette puissance est maximale (notée P_{max}) pour un point de fonctionnement A de la courbe courant-tension, (figure II.4) [7].

Le nom "facteur de forme" (*fill factor*) dérive de la représentation graphique. Il est défini par la relation suivante :

$$ff = \frac{P_{max}}{V_{co} \times I_{cc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{oc} \times I_{cc}} \quad (\text{II.5})$$

- **Le rendement :**

Le rendement, η (*efficiency*) des cellules PV désigne le rendement de conversion en puissance. Il est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule (la puissance obtenue aux bornes de la cellule) P_{max} et la puissance lumineuse incidente P_{in} [8].

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{in}} = \frac{ff \times I_{CC} \times V_{oc}}{P_{in}} \quad (\text{II.6})$$

- **Le rendement quantique, EQE :**

Le rendement quantique est le rapport entre le nombre d'électrons dans le circuit externe et le nombre de photons incidents. Lorsque les photons perdus par réflexion (à la fenêtre de la cellule) et les photons transmis (à cause de l'absorption incomplète) ne sont pas pris en compte, cette grandeur s'appelle alors le rendement quantique interne, IQE (internal quantum efficiency). Dans le cas contraire, ce paramètre s'appelle le rendement quantique externe, EQE (external quantum efficiency). Le rendement quantique est défini comme suit [8] :

$$EQE = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \times \frac{E_{ph}(\lambda)}{e} = \frac{J_{cc}(\lambda)}{\varphi(\lambda)} \times \frac{hc}{e\lambda} \quad (\text{II.7})$$

Où :

J_{cc} : La densité de courant de court-circuit.

J : Le flux lumineux incident.

E : La charge de l'électron.

E_{ph} : L'énergie du photon.

Avec :

$E_{ph} = hc/\lambda$, h étant la constante de Plank, c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde.

Le rapport $J_{cc}(\lambda)/j(\lambda)$ est appelé la réponse spectrale de la cellule, elle est notée $SR(\lambda)$. Cette dernière représente la sensibilité de la cellule pour chaque longueur d'onde. Elle est souvent utilisée dans le marché de l'électronique comme caractéristique des photodiodes. EQE peut s'écrire suivant l'expression :

$$EQE = SR(\lambda) \times \frac{hc}{e\lambda} \quad (\text{II.8})$$

Le rendement quantique dépend du coefficient d'absorption des matériaux utilisés, de l'énergie d'ionisation, de la largeur de la zone de déplétion et de l'efficacité de collecte. Il est mesuré en fonction de la longueur d'onde émise par une source monochromatique. Le rendement de 100 % dans le cas idéal (sans pertes) correspond à la récolte par les électrodes d'une paire électron-trou par photon incident. Des valeurs de 50 % et 80 % ont été reportées pour les matériaux organiques et inorganiques respectivement [14] [15].

- **Les paramètres d'une cellule photovoltaïque :**

Cinq paramètres influent sur le comportement électrique d'une cellule ou d'un générateur photovoltaïque. Ces paramètres sont :

- La résistance série R_s ;
- La résistance shunt R_{sh} ;
- Le courant de saturation I_{sat} ;
- Le flux d'éclairement ;
- La température T .

Pour un flux ϕ égal à 1 kW/m^2 , ces paramètres peuvent être considérés comme indépendants, excepté le courant de saturation I_{sat} qui dépend directement de la température T de la cellule [9].

A. Influence de la résistance série :

D'une valeur généralement très petite, la résistance série agit sur la pente de la caractéristique dans la zone où la cellule se comporte comme un générateur de tension (figure II.9). Elle ne modifie pas la tension de circuit ouvert. Lorsqu'elle est anormalement élevée, elle peut diminuer notablement la valeur du courant de court-circuit [10].

La valeur de la résistance série est fonction de la résistivité du matériau semi-conducteur, des résistances de contact des électrodes et de la résistance de la grille collectrice.

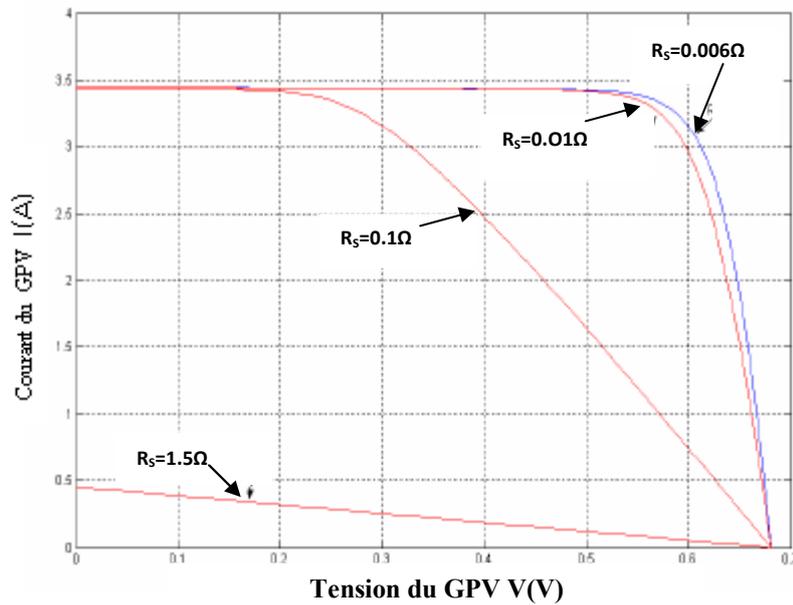


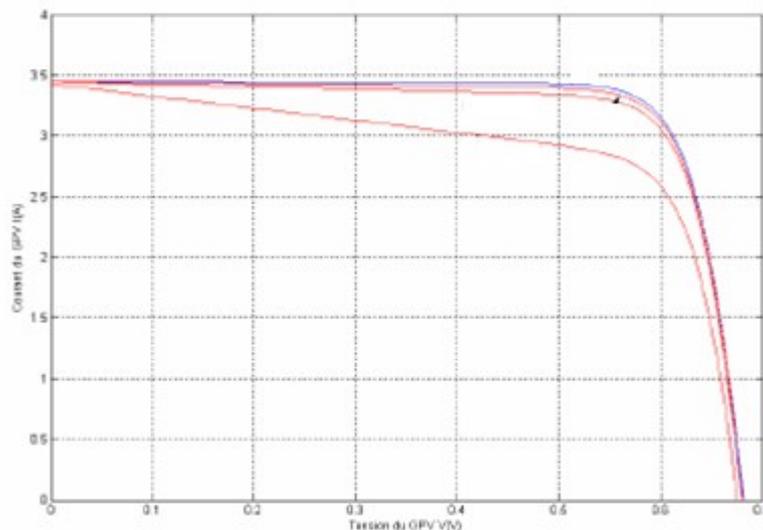
Figure II.9 : Influence de la résistance série sur la caractéristique courant-tension d'un générateur photovoltaïque.

B. Influence de la résistance shunt :

Il s'agit le plus souvent d'une conductance de fuite. C'est comme si l'on devait soustraire au photo-courant, outre le courant de la diode, un courant supplémentaire proportionnel à la tension développée.

La résistance shunt est en général très élevée. Si elle diminue on remarque une légère pente au voisinage du point de courant de court-circuit sur la caractéristique courant tension de la cellule photovoltaïque (figure II.10).

Une résistance shunt trop faible aura un



impact sur la tension de circuit-ouvert de la cellule : en effet, une cellule photovoltaïque dont la résistance shunt est trop faible ne donnera plus de tension sous un faible éclairement [10].

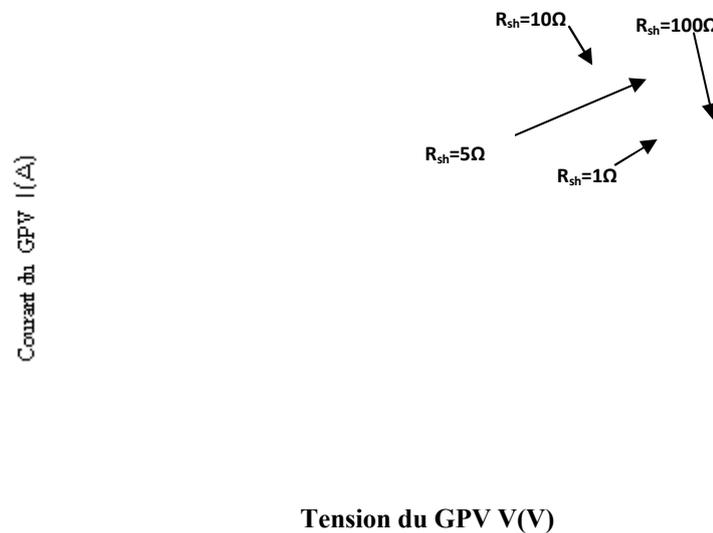


Figure II.10 Influence de la résistance shunt sur la caractéristique courant-tension d'un générateur photovoltaïque.

- **Adaptation d'impédance :**

Si on considère la caractéristique courant-tension de la cellule photovoltaïque pour un niveau de flux solaire et à une température T fixes, et si l'on place une charge variable R aux bornes de cette cellule, le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection de la caractéristique courant-tension de la cellule avec celle de la charge (figure II.8).

Tension du GPV $V(V)$

- ✓ La caractéristique d'une charge résistive est une droite de pente égale à R (sachant que : $\frac{I}{V} = \frac{1}{R}$).

- ✓ La puissance délivrée à cette charge ne dépendra que de la valeur de la résistance R.
- ✓ La puissance maximale est obtenue pour $R=R_{opt}$.

$$P_{max} = V_{max} \cdot I_{max} \quad (II.9)$$

Si la valeur de la charge R est petite, la cellule photovoltaïque travaillera dans la région MN de la courbe représentée dans la figure (II.5). C'est la région où la cellule se comporte comme une source de courant presque égale au courant de court-circuit.

Si la valeur de la charge R est élevée, la cellule photovoltaïque travaillera dans la région PS de la courbe, dans laquelle la cellule se comporte comme un générateur de tension constante presque égale à la tension de circuit-ouvert [10].

II.3 Le module photovoltaïque

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules photovoltaïques sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12 V et les modules auront donc généralement 36 cellules.

Pour protéger au mieux les cellules solaires des intempéries, elles sont réunies dans un module. Dans la plupart des cas, ce module est constitué d'une face supérieure en verre renforcé parfaitement transparent et d'une face inférieure recouverte d'un film spécial (feuille de Tedlar).

Entre ces deux faces, les cellules solaires sont insérées dans une masse étanche transparente et résistante aux ultra violet (UV), une boîte de jonction étanche muni de diodes de protection contre les point chaud est fixé à la face arrière, elle permet aussi la connexion du module au circuit extérieur.

Les modules peuvent être connectés en série ou en parallèles pour construire le champ photovoltaïque afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation.

Toutefois, il est important de prendre quelque précaution car l'existence de cellules moins efficaces où l'occlusion d'une ou plusieurs cellules (dus à l'ombrage de la poussière, etc...), peuvent endommager les cellules de façon permanente [16].

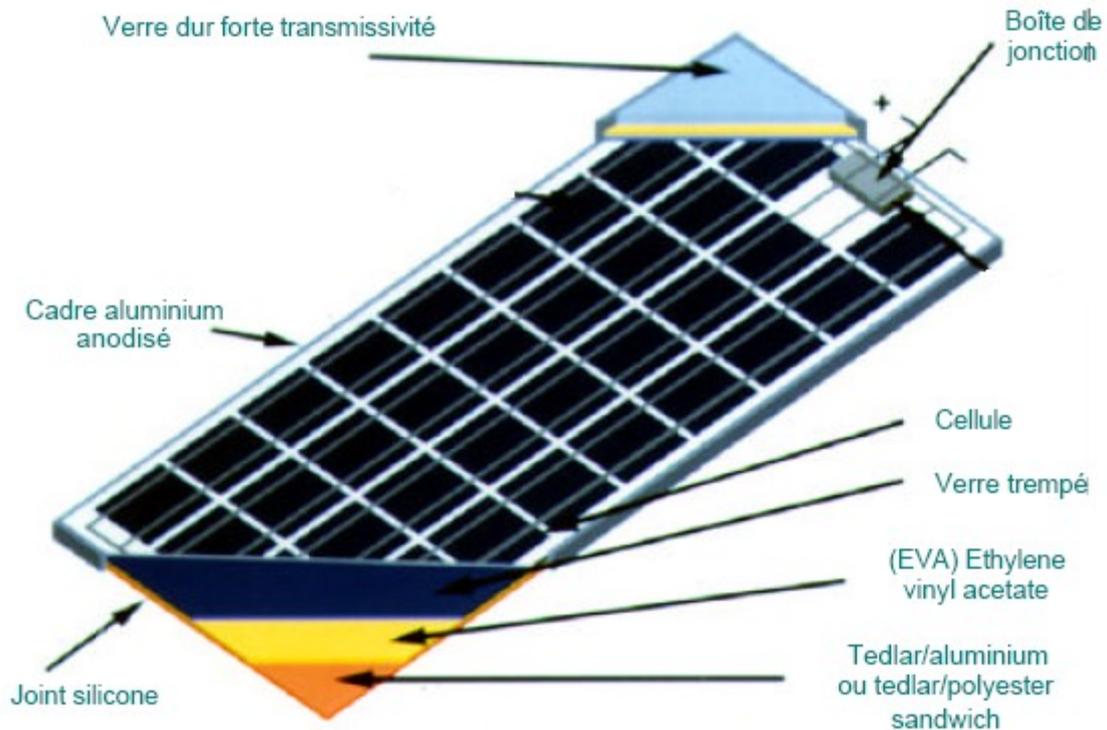


Figure II.11 : Vue en coupe d'un module PV [16].

A. Association en série :

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste le même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série (voir figure II.12) [7].

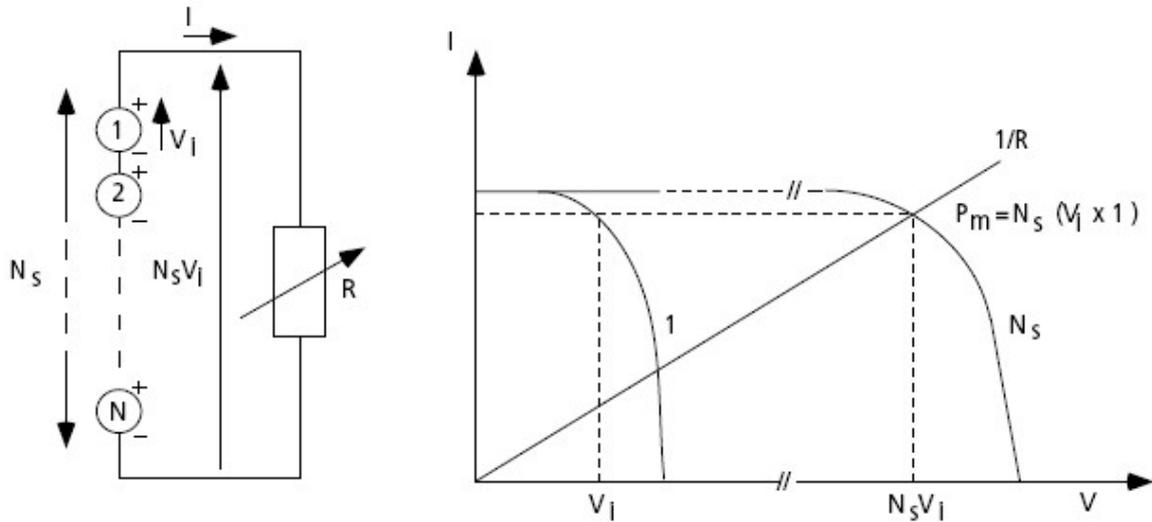


Figure II.12 : Cellules identiques en série.

Si les cellules des modules en série ne sont pas identiques ou si certaines cellules sont partiellement ombragées, la tension d'utilisation des modules en série sera légèrement diminuée (voir figure II.13). Pour une impédance de charge faible, les cellules moins efficaces peuvent devenir réceptrices si le courant d'utilisation est inférieur au courant produit par ces cellules. Ainsi, pour une impédance nulle (court-circuit), une cellule ombragée sera soumise à ses bornes à une tension inverse égale à la somme des tensions délivrées par les autres cellules. La puissance que devra dissiper cette cellule sera de : $P_2 = V_t \times I$.

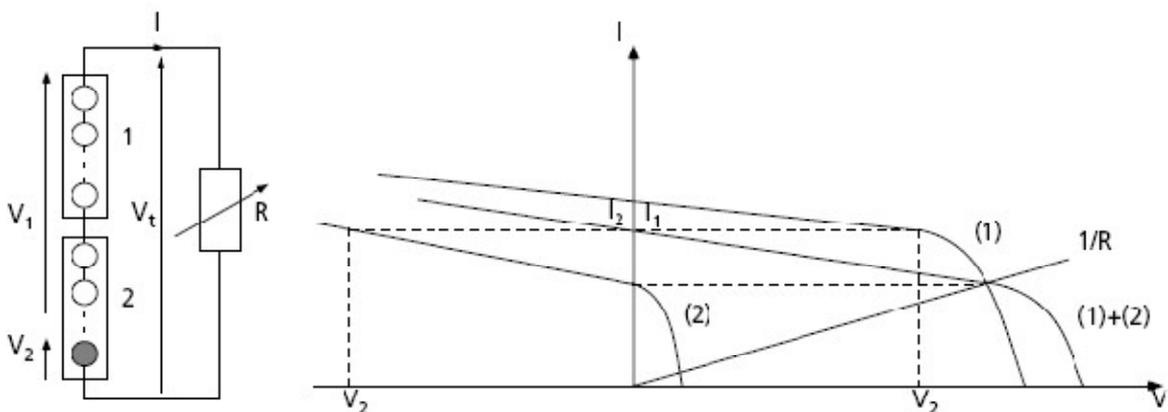


Figure II.13 : Modules en séries avec cellules occultées.

En fonctionnant ainsi, on provoque l'échauffement de la cellule (*hot spot*), ce qui est susceptible de la détruire par claquage. Il convient donc de limiter la tension inverse maximale susceptible de se développer aux bornes d'une cellule en plaçant une diode parallèle (*by-pass*) au niveau de chaque module (voir figure II.14). La diode parallèle limite la tension inverse par sa tension directe puisqu'elle devient passante. En court-circuit, le courant traversant la diode est $I_1 - I_2$. La puissance dissipée par la cellule moins efficace se limite à l'ordre du watt, ce qui évite toute destruction. La diode parallèle est inopérante en fonctionnement normal et ne diminue pas le rendement des modules.

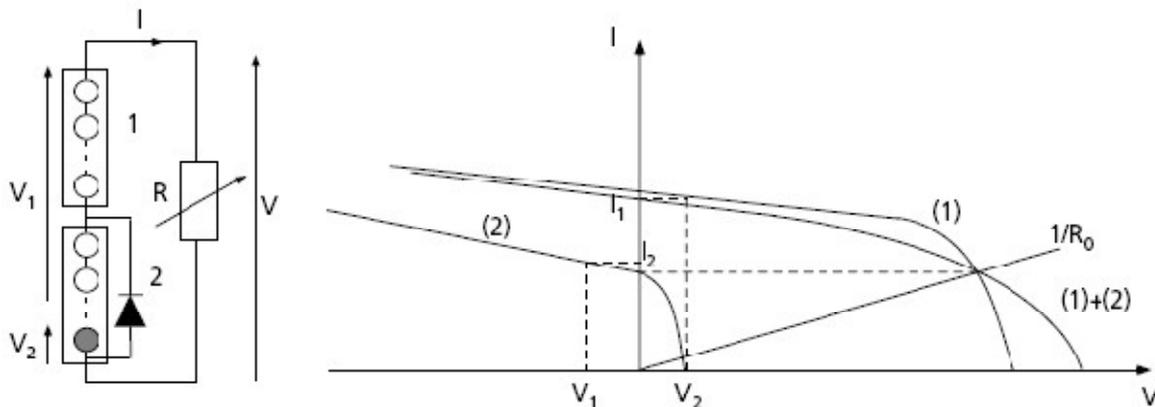


Figure II.14 : Modules en série avec diodes parallèles.

B. Association en parallèles :

En additionnant des modules identiques en parallèles, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèles dans la branche.

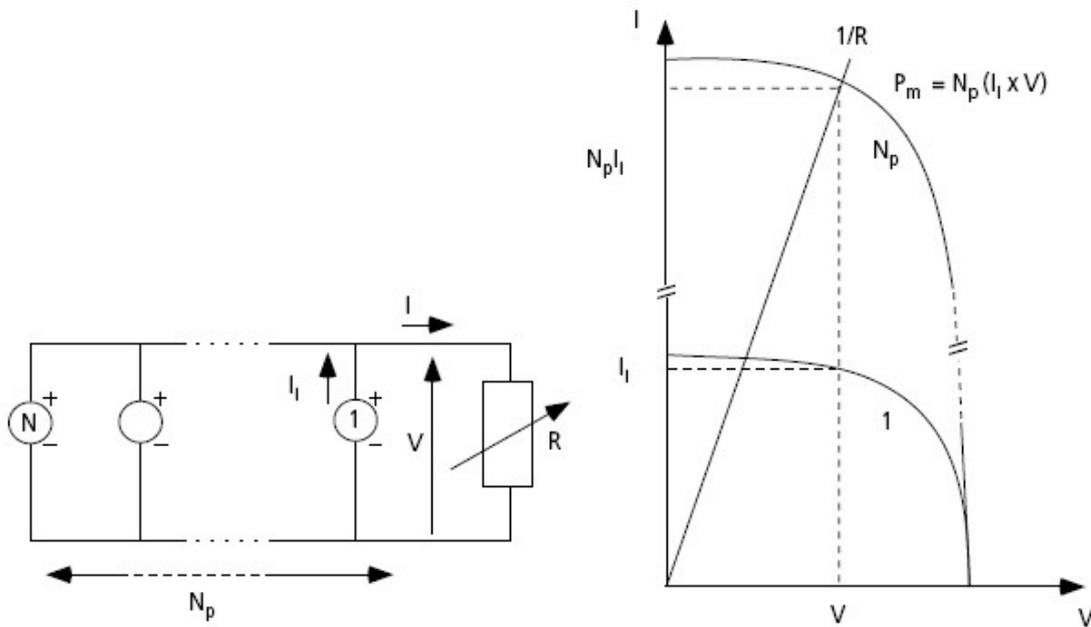


Figure II.15 : Cellules identiques en parallèles.

Si les modules en parallèles ne sont pas identiques ou si quelques cellules d'un module sont ombragées, le courant d'utilisation total des modules sera plus faible. Pour une impédance de charge élevée, les modules moins performants deviendront récepteurs si la tension d'utilisation est supérieure à la tension produite par ces modules. Une dissipation de puissance importante peut devenir dangereuse au niveau de la cellule la plus faible de ces modules. Ainsi pour le cas le plus critique où la charge est nul et le circuit ouvert, le courant des branches des modules performants se dissipera dans la branche la moins performante.

Bien que la cellule puisse dissiper un courant important, il est préférable de disposer d'une diode anti-retour. Celle-ci empêche aussi de gaspiller dans le module occulté une partie de la puissance produite par les modules fonctionnant normalement. Cette solution n'est valable que si la chute de tension provoquée par cette diode est négligeable devant la tension produite par les modules de la branche. En effet, cette diode est traversée, en fonctionnement normal, par le courant de la branche, ce qui introduit une perte de puissance permanente.

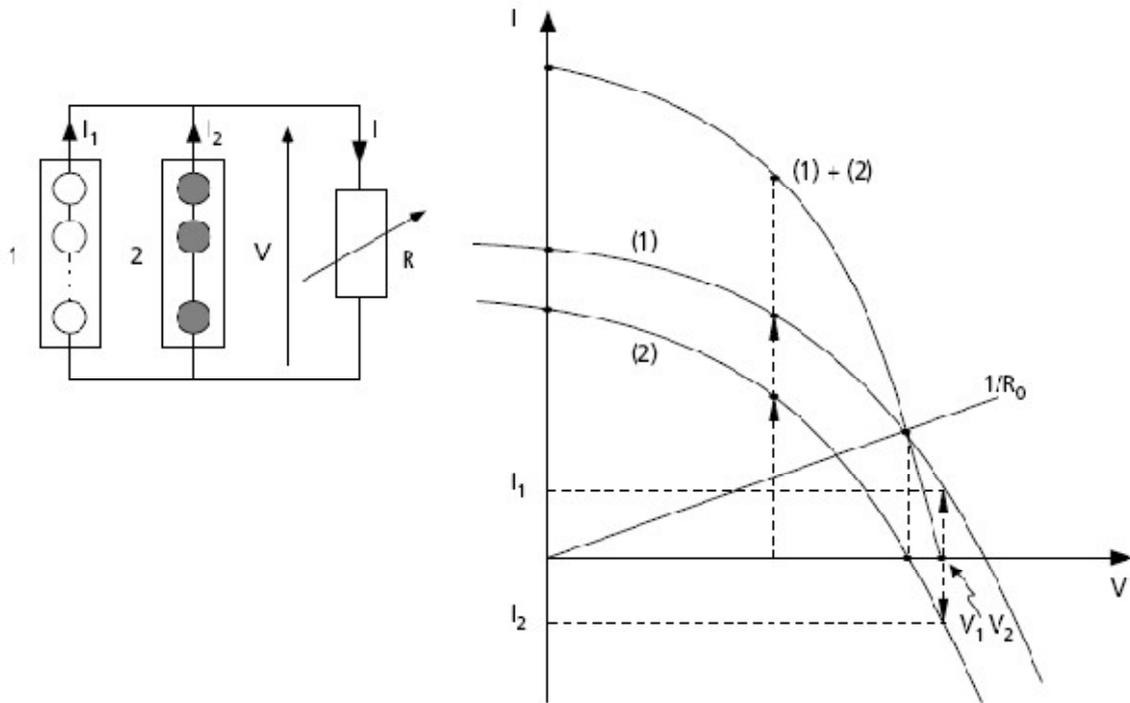


Figure II.16 : Modules en parallèles avec cellules occultées.

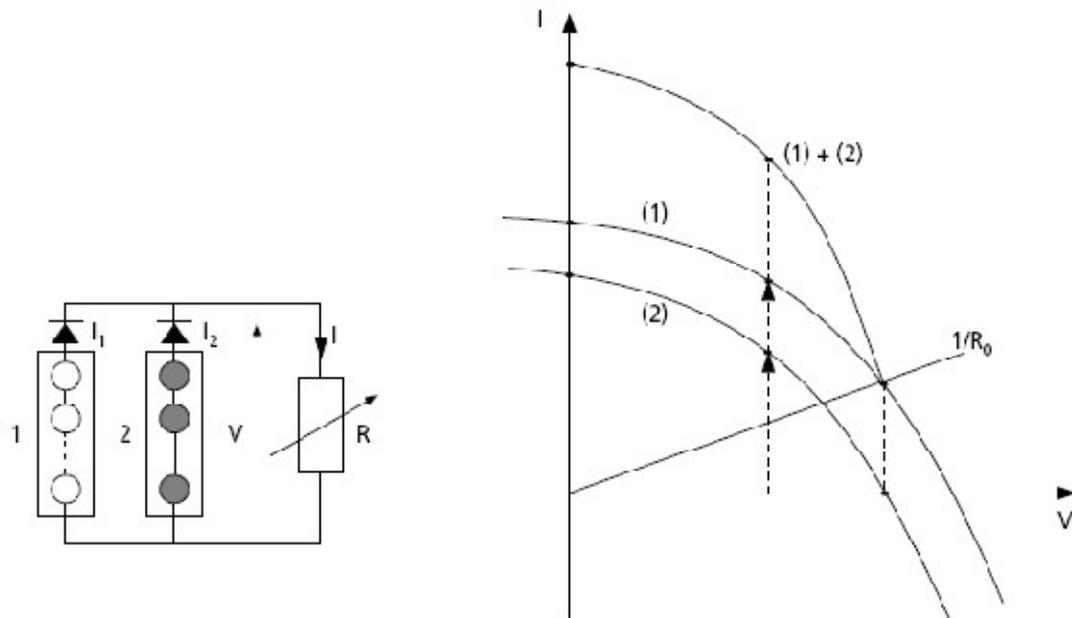


Figure II.17 : Modules en parallèles avec diodes anti-retour.

C. Caractéristique électrique (I-V) d'un module :

Caractéristique électrique $I = f(V)$ suivant un éclairement variable (pour une température de jonction de 25°C et une répartition spectrale du rayonnement dit AM 1.5).

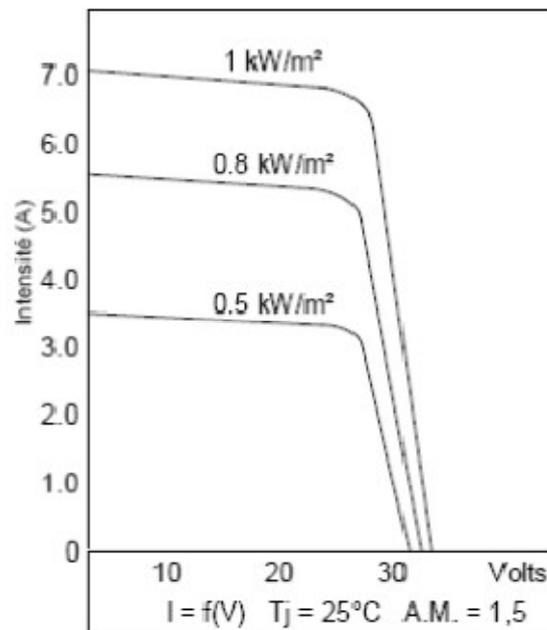


Figure II.18 : Caractéristique courant tension d'un module sous différents éclairement.

- **Puissance de crête :**

Exprimées en watt-crête (Wc), c'est la puissance maximale d'un élément ou d'un ensemble photovoltaïque, travaillant dans des conditions de température et d'ensoleillement normalisées, une irradiation de 1000W/m^2 , alors que la température des cellules est de 25°C [10].

- **Le rendement de la conversion :**

Le rendement de la conversion est défini par le rapport suivant :

$$\eta = \frac{P_{opt}}{S \Phi} \quad (\text{II.10})$$

P_{opt} : la puissance électrique optimale délivrée par le module photovoltaïque exprimée en watt.

Φ : le flux reçu en W/m^2 .

S : la surface effective du générateur photovoltaïque en m^2 [10].

II.4 Les panneaux photovoltaïques

Le panneau photovoltaïque est lui-même constitué d'un certain nombre de modules interconnectés en série-parallèle et réunis sur une même structure porteuse.

II.4.1 Caractéristique courant-tension d'un panneau photovoltaïque

La figure (II.19) prouve que le courant de sortie I est considérablement influencé par le changement de l'irradiation, tandis que la tension V de sortie reste approximativement constante. En revanche, pour une température variable, la tension change considérablement, tandis que le courant demeure constant [11].

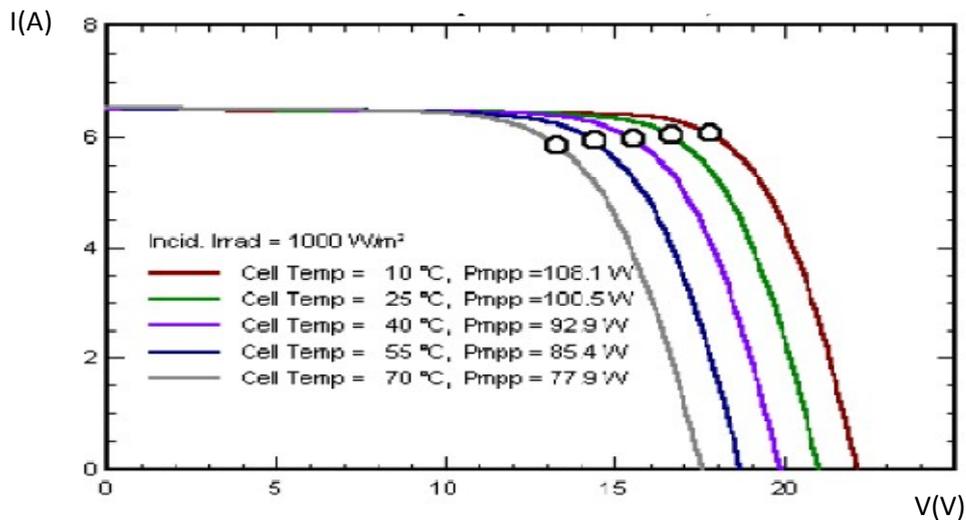


Figure II.19 : Caractéristiques courant – tension $I=f(V)$ d'un panneau PV à éclairement constant en fonction de la température.

II.4.2 Caractéristiques puissance-tension d'un panneau photovoltaïque

Comme on remarque dans la figure (II. 20), la puissance de sortie d'un panneau solaire est considérablement réduite pour une insolation décroissante. On remarque encore un effet qui ne pourrait pas être immédiatement évident : la puissance de sortie est inversement proportionnelle à la température du module [11].

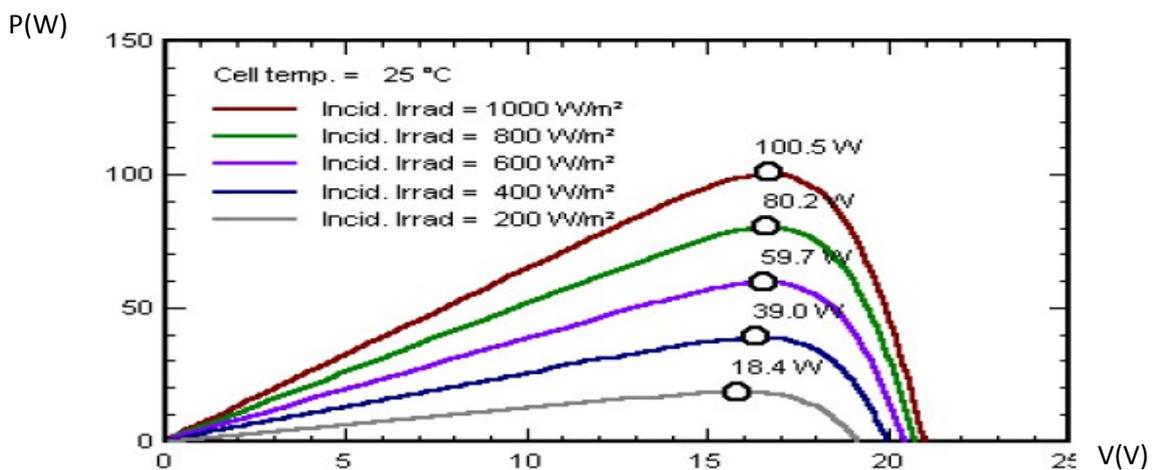


Figure II.20 : Courbes de puissance en fonction de la tension aux bornes d'un panneau PV.

II.5 Installation des panneaux

a. Choix du site d'installation du générateur :

Pour ne pas perturber par occultation le fonctionnement des modules, le site d'implantation du champ doit être éloigné des éventuels masques. En effet, une occultation même légère de quelques cellules du panneau peut :

- Provoquer la destruction des cellules (phénomène de HOT SPOT) [16], [17] ;
- Occasionner des pertes d'énergie assez importantes.

b. Disposition des panneaux :

La disposition des panneaux doit satisfaire à deux exigences principales qui sont :

- L'écartement entre rangées de panneaux doit être choisi de manière à éviter l'occultation d'une série de modules par les autres panneaux. Il est donc nécessaire de se référer aux courbes décrivant les mouvements apparents du soleil en fonction de la saison et de l'heure.
- Les panneaux doivent être placés de telle manière que les longueurs de câbles de liaison soient à peu près égales afin d'éviter des déséquilibres pouvant entraîner des pertes d'énergie.

La disposition optimale pourrait correspondre à une ellipse dont le foyer serait le point de collecte de l'énergie.

c. Fixation des panneaux :

Les panneaux doivent être toujours orientés et inclinés de manière à capter la plus grande quantité d'énergie possible. Leur fixation doit permettre de garder toujours l'inclinaison et l'orientation choisie.

d. Structure :

Il est important que les structures porteuses aient une durée de vie élevée, au moins égales à celles des modules pour éviter de les changer fréquemment. Les structures peuvent être acquises avec les modules ou fabriquées par l'organisme chargé de la conception et du montage de l'installation. Une bonne structure doit :

- Etre capable de résister aux intempéries (vents par exemple) ;
- Permettre une bonne ventilation naturelle des panneaux en prévoyant des passages suffisants pour l'air ;
- Etre réalisée de manière à réduire autant que possible les coûts de fabrication, de montage et les difficultés d'installation. En ce qui concerne la facilité du montage, on devrait chercher à limiter le nombre de pièces à monter. Les systèmes de fixation au sol (poteaux) et l'utilisation des outils spéciaux pour le montage. Cela peut entraîner une réduction des travaux de génie civil et du coût ;
- Pour maximiser la quantité d'énergie reçue sur les panneaux, on peut prévoir une structure à inclinaison variable en fonction des saisons ;

e. Câblage électrique :

Pour que le système puisse fonctionner normalement, le réseau de câblage doit satisfaire à certaines conditions citées ci-après :

- Permettre un control et un dépannage facile et rapide ;
- Utiliser des sections de câble adaptées au courant débité ;
- Utiliser des boîtiers de connexion étanches pour éviter une corrosion extérieure pouvant occasionner des résistances en série non négligeables ;
- Utiliser des longueurs des câbles électriques équivalentes afin de limiter les déséquilibres.

II.6 Champs de modules photovoltaïques

Afin d'obtenir des puissances de quelques KW à quelques MW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées série et parallèles pour former ce que l'on appelle parfois une sous-station, voir les figures : (II.21) et (II.22).

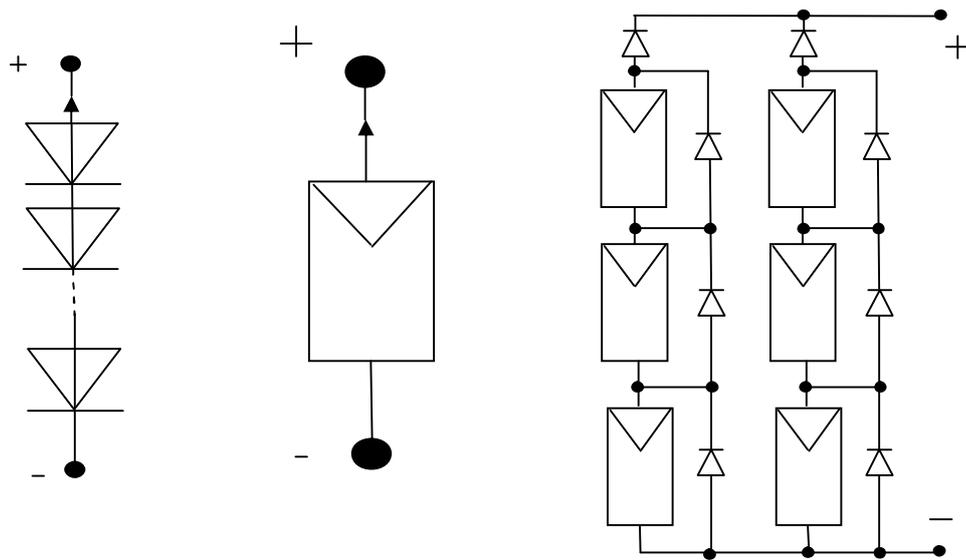


Figure II.21 : cellule, module et le champ photovoltaïque [19].

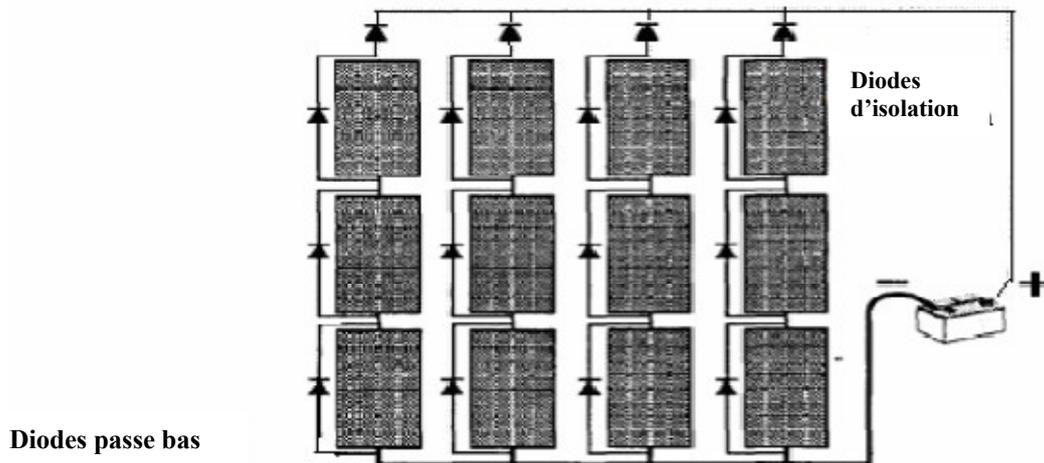


Figure II.22 : Modules PV connectés en série et en parallèle avec des diodes by-pass et les Diodes d'isolation [19].

II.7 Les batteries

Les générateurs photovoltaïques autonomes ont besoin d'un stockage électrique pour assurer une fourniture d'énergie quasi permanente quelles que soient les séquences d'ensoleillement.

La batterie sert à stocker l'énergie produite par le champ de modules PV. Il y a nécessité de stockage chaque fois que la demande énergétique est décalée dans le temps vis-à-vis de l'apport énergétique solaire, En effet :

- La demande énergétique est fonction de la charge à alimenter, les appareils utilisés fonctionnent soit en continu, soit à la demande.
- L'apport énergétique solaire est périodique (alternance jour/nuit, été/hiver) et aléatoire (conditions météorologiques).

Ce décalage entre la demande et l'apport énergétique nécessite un stockage d'électricité.

Dans un système photovoltaïque, la batterie remplit trois fonctions importantes :

- **Autonomie** : une batterie permet de répondre aux besoins de la charge en tout temps, même la nuit ou par temps nuageux ;
- **Courant de stockage** : une batterie permet de fournir un courant de surcharge pendant quelques instants, c'est-à-dire un courant plus élevé que celui que peut fournir le champ PV. Ceci est nécessaire pour faire démarrer les moteurs et les autres appareils requérant un courant de démarrage de 3 à 5 fois supérieur au courant d'utilisation ;
- **Stabilisation de la tension** : une batterie permet de fournir une tension constante, en éliminant les écarts de tension du champ PV et en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée [7].

II.7.1 Types de batteries

Les deux types de batterie utilisés le plus couramment dans les systèmes photovoltaïques sont les batteries avec accumulateurs au plomb-acide (Pb-acide) et les batteries avec accumulateurs au nickel-cadmium (Ni-Cd).

Remarque : les batteries avec plomb sont les plus utilisées en raison de leur faible coût et d'une maturité étayée par un retour d'expérience conséquent. Cette technologie est par ailleurs largement disponible dans le commerce.

II.7.2 Caractéristique des batteries

- Tension nominale :

La tension aux bornes d'un élément accumulateur au plomb est voisine de 2 V. Sa valeur varie entre 1.7 V et 2.4 V suivant l'état de charge. La tension nominale des batteries au plomb sera donc un multiple de 2 V (6, 12, 24, 48, ...).

- Capacité d'un accumulateur :

La capacité d'un élément d'accumulateur est la quantité qu'un élément chargé peut fournir pendant la période de décharge, elle s'exprime en ampères-heures [Ah]. La capacité d'un élément est fonction du régime de décharge. Plus un régime de décharge est élevé, plus la capacité diminue. Les fabricants d'accumulateurs proposent des courbes présentant la capacité de l'accumulateur en fonction du courant de décharge. Ce courant est indiqué par le rapport C/n , C étant la capacité de l'accumulateur.

Un accumulateur de capacité 100 Ah à $C/100$ pourra délivrer 100 Ah avec un courant de décharge de $C/100$ soit 1 ampère. Il pourra donc délivrer 1 ampère pendant une heure.

Attention : si le courant de décharge est supérieur à 1 ampère, la capacité sera inférieure à 100 Ah.

- Conservation de la charge (ou autodécharge) :

C'est la perte de capacité en pourcentage de la capacité nominale lorsque la batterie n'est utilisée. Pour une batterie en bon état de fonctionnement, elle ne doit pas être supérieure à 3% par mois.

- Rendement de charge / décharge :

Il s'agit du rendement énergétique (exprimé en [Wh/Wh] ou faradique [Ah/Ah]) lors d'un cycle complet de charge / décharge. La valeur moyenne sur une longue période est d'environ 70%.

- Aptitude au cyclage :

C'est le nombre de cycles journalier de charge / décharge que peut supporter la batterie, les meilleures batteries utilisées en photovoltaïque (batteries stationnaires à grande réserve d'électrolyte) ont un nombre de cycles garanti supérieur à 3000 pour une profondeur de décharge journalier de 10 % et de 1500 pour 20% de décharge journalière avant de perdre 20% de leur capacité. Les batteries moins bien adaptées ont des valeurs typiques de 1200 et 600 cycles pour ces mêmes valeurs de décharge.

La durée de vie maximale des meilleures batteries en usage photovoltaïque (environ 10 ans) est très inférieure à celle des modules. Elles constituent donc un maillon faible dans un système photovoltaïque. C'est pourquoi leur protection contre les surcharges et les décharges profondes et leur entretien doivent faire l'objet de soins attentifs.

II.7.3 Différent types de batteries utilisable pour les applications PV

Type de batteries	capacités	particularités
Batteries formées d'éléments stationnaires à plaque positive tabulaire (2V) et grande réserve d'électrolyte	1 000 à 3 000 Ah	Bien adaptées aux cycles journaliers et saisonniers rencontrés dans les systèmes photovoltaïques
Batteries formées d'éléments stationnaires à plaques planes (2V) et grande réserve d'électrolyte	10 à 3 000 Ah	Durée de vie plus courte que la précédente (nombre de cycles inférieur)
Batteries plomb étanches sans entretien (2V, 6V et 12V)	10 à 500 Ah	Nécessite très peu de maintenance
Batteries monobloc dérivées de la batterie automobile	10 à 500 Ah	Aptitude au cyclage moins élevée Réservées aux petites installations

II.7.4 Installation des éléments de la batterie :

L'utilisation de la batterie peut présenter certain danger, comme le risque d'explosion, et dégagement de gaz toxiques (brouillard d'acides sulfurique). En outre, leur durée de vie et le bon fonctionnement de toute l'installation dépend aussi bien des conditions d'installation que d'exploitation.

Compte tenu de cela, l'installation de ces éléments doit être effectuée avec grand soin. Ils doivent être installés dans un local approprié à l'abri des intempéries, surtout quand le produit de la capacité (en Ah) par la tension (en V) de décharge est supérieure à 1000. Ce local doit satisfaire à certaines exigences qui sont les suivantes :

- D'être bien ventilé garantir la circulation des gaz émanent de ces derniers ;
- D'être à une température proche de 25°C, pour assurer le bon fonctionnement des éléments. Ainsi la température a une influence notable sur leur fonctionnement : si elle est trop élevée, l'activation des réactions électrochimiques provoque une usure rapide des plaques ; par contre, si elle est très basse, le rendement est fortement diminué ;
- De ne pas installer des équipements ou matériels pouvant provoquer un arc électrique (régulateur,...).

II.7.5 Aspect extérieur

Les éléments des accumulateurs sont souvent montés dans des bacs devant être isolés du sol pour éviter le refroidissement de l'électrolyse, par l'intermédiaire de support en bois. La disposition des éléments doit faciliter leur inspection. Ces bacs sont réalisés en plastique transparent, afin de bien visualiser le repérage de niveau de l'électrolyte.

II.7.6 Connexion :

Les éléments de la batterie sont généralement reliés en série jusqu'à obtenir la tension correspondante désirée par l'intermédiaire de connexions boulonnées. Les câbles de liaison entre ces éléments doivent être dimensionnés de manière à avoir une chute de tension très faible quelque soit le régime.

II.7.7 Mise en service :

Pour une utilisation immédiate, les éléments de la batterie sont livrés avec l'électrolyte. A l'exploitation, ils sont livrés chargés secs. Pour la première mise en service de cette batterie, le générateur photovoltaïque est câblé spécialement pour effectuer la charge d'égalisation, après avoir préalablement effectué le remplissage en électrolyte des éléments.

II.8 Onduleur

Il a pour but de convertir le courant continu des panneaux photovoltaïque en courant alternatif (DC-AC), c'est un appareil électrique de haute technologie conçu pour répondre à toutes les exigences du réseau, comme la qualité, la sécurité et la fiabilité, et pour permettre un contrôle parfait du fonctionnement.

Il se présente sous la forme d'un boîtier métallique de petite dimension, muni d'un radiateur et doit être placé sur un support vertical (mur par exemple). Il n'émet aucun parasite électromagnétique et ne génère quasiment aucun bruit. Afin de limiter les pertes, il doit être placé le plus près possible des panneaux photovoltaïque.

L'onduleur arrête automatiquement de fonctionner lorsque le réseau est mis hors tension, une sécurité est en effet prévue afin de supprimer les risques d'électrocution lorsque des techniciens font une opération de maintenance sur le réseau.

Les onduleurs peuvent être caractérisés par :

- Leur puissance nominale correspondant à la puissance qu'ils peuvent délivrer en fonctionnement normal. théoriquement, cette puissance devrait être égale à la somme des puissances de l'ensemble des équipements installés sur le réseau. Cependant, le choix de cette puissance nominale pour un onduleur se fera surtout en tenant compte des types de moteurs branchés sur le réseau, car ces derniers sont consommateurs d'énergie surtout au démarrage ;
- Leur rendement qui est un critère très important, car il influe par là sur le dimensionnement de la batterie et du champ photovoltaïque. Celui-ci varie en fonction de la charge, ainsi que la variation de ce rendement diffère d'un onduleur à un autre. Mais il importe surtout que le rendement soit élevé sur une plage de puissance aussi large que possible ;

- Leur consommation à vide doit être également faible (pertes à vide) ;
- La forme de la tension de sortie adaptée.

II.9 Redresseur

Le redresseur réalise la conversion courant alternatif, courant continu (AC-DC), dans les systèmes hybride, il est souvent utilisé pour charger des batteries a partir d'une source a courant alternatif (générateur diesel), c'est un appareil relativement simple, pas cher et a bon rendement.

II.10 Générateur diesel (appoint)

Concernant l'appoint éventuel, un générateur diesel est nécessaire.

II.10.1 Caractéristiques principales

D'après les renseignements recueillis auprès des constructeurs [17] [20], on peut retenir les caractéristiques ci-après :

- **La consommation du combustible** : Elle est fonction surtout, du régime d'utilisation (taux de charge) et du lieu d'implantation, elle décroît quasi-linéairement quand on diminue la charge.
- **Le rendement** : Le rendement instantané est fonction du taux de charge.
- **La durée de vie** : C'est une caractéristique très importante qui dépend des conditions d'utilisation du générateur et s'exprime en heures de fonctionnement.

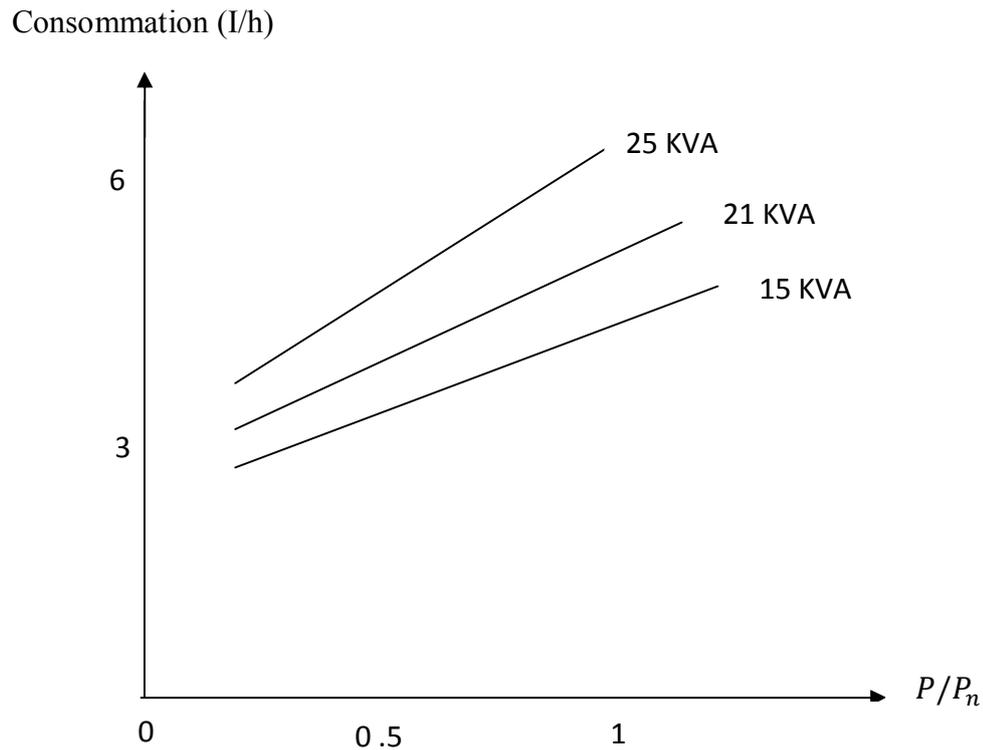


Figure II.23 : variation de la consommation du combustible en fonction du taux de charge.

II.10.2 Installation du générateur diesel

Les conditions ci-dessous doivent être respectées pour l'installation du groupe :

- L'emplacement doit être facile d'accès (pour faciliter l'approvisionnement du combustible et doit garantir une bonne isolation contre le bruit ;
- Le groupe doit être placé dans un local qui assure les fonctions suivantes :
 - ✓ Isolation contre le bruit.
 - ✓ Isolation contre les intempéries.
- Le local doit permettre une inspection et un entretien facile du groupe ;
- Le local doit avoir des grilles de prises d'air et de ventilation ;
- Pour les générateurs de grande puissance, la ventilation doit être assurée par des ventilateurs.

II.11 Le système de régulation

II.11.1 Rôle de la régulation dans un système photovoltaïque :

Dans tout système photovoltaïque, on intercale un système dit de régulation, assurant deux fonctions principales, à savoir :

- protection de la batterie contre les surcharges et les décharges profondes ;
- permettre d'effectuer un transfert optimal d'énergie du champ photovoltaïque à l'utilisation.

Ces deux fonctions sont remplies généralement par des circuits ou des dispositifs électroniques, constituant le système de régulation proprement dit et comprenant :

- un régulateur de charge ;
- un régulateur de décharge.

II.11.2 Principe de fonctionnement des régulateurs

II .11.2.1 Information sur l'état de charge :

Dans les systèmes photovoltaïques, le régulateur doit maintenir l'état de charge de la batterie entre deux seuils : un seuil haut et un seuil bas. Afin de ne pas endommager la batterie, il est conseillé d'éviter toute surcharge et de ne pas faire charger la batterie quand son état de charge atteint 90 %. Pour remplir cette fonction, certains régulateurs possèdent un système de comptage, comptabilisant les quantités d'énergie entrant et sortant du système de stockage, la plus part des régulateurs utilisent la tension de la batterie comme indicateur de l'état de charge.

II .11.2.2 Régulation de la décharge :

Un comparateur compare la tension de la batterie à un seuil de tension pré-réglé bas et transmet l'information à un circuit de commande, arrêtant la décharge lorsque la tension de la batterie atteint ce seuil. Pour les batteries au plomb, la tension par élément doit être supérieure ou égale à 1,8 volts (appelée tension d'arrêt).

Afin d'éviter une oscillation de la tension (néfaste pour la batterie) du au fait que l'interruption de la décharge provoque une légère augmentation de la tension, on utilise deux seuils de tension.

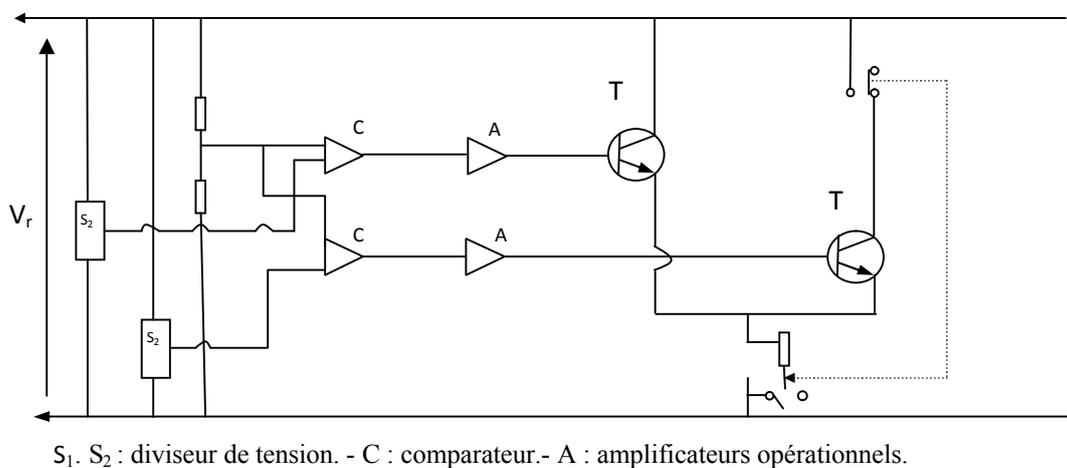


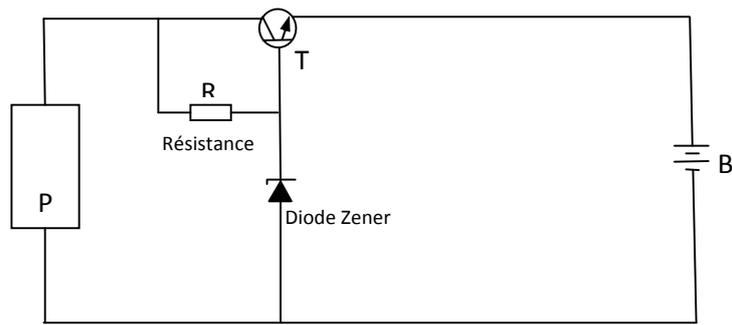
Figure II.24 : Schéma de principe d'un régulateur de décharge à deux seuils.

II .11.2.3 Régulateur de la charge :

On doit éviter que la tension par élément dépasse 2,4volts (tension de surcharge) pour les batteries au plomb. Il existe alors plusieurs types de montage des régulateurs de charges.

II .11.2.4 Régulateur de charge série :

Le principe consiste à intercaler entre le panneau photovoltaïque et la batterie un dispositif qui module le courant. Le dispositif fonctionne de la manière suivante : le panneau p charge la batterie tant que la tension de cette dernière est inférieure à la tension caractéristique de la diode ZENER (DZ), le transistor (T) étant passant.



P : panneau photovoltaïque – B : batterie d'accumulateurs

Figure II.25 : Schéma de principe d'un régulateur série.

II .11.2.5 Régulateur de charge à coupure :

La tension des batteries est mesurée et comparée à une tension de référence. Un dispositif actionne un relais et isole le générateur P si la tension est supérieure ou égale au seuil haut ; il rétablit le contact lorsque la tension devient inférieure ou égale au seuil bas.

II .11.2.6 Régulateur de charge à découpage :

Ce type de régulateur utilise un convertisseur continu-continu qui délivre à la batterie B sa tension de floating à chaque fois que la tension de la batterie atteint le seuil haut.

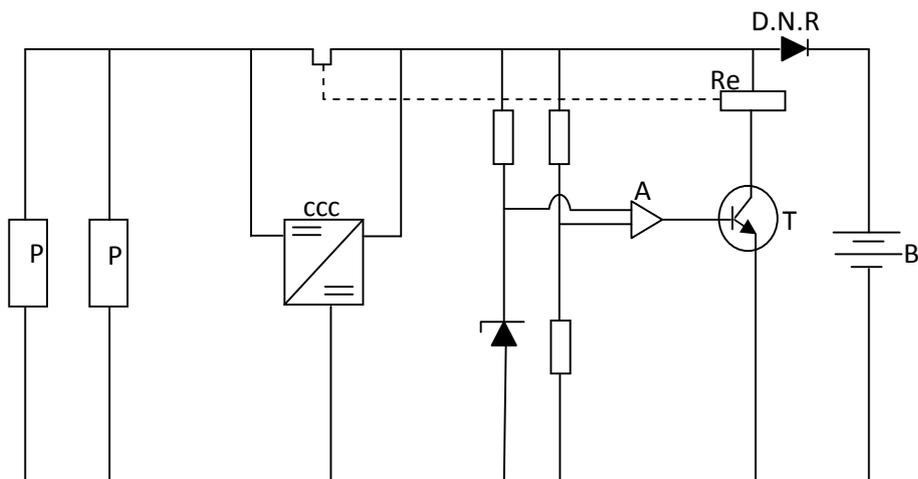


Figure II.26 : Schéma de principe d'un régulateur de charge à découpage.

II .11.2.7 Régulateur de charge série à coupure partielle :

Ce type de régulateur permet de fractionner le panneau photovoltaïque en deux parties délivrant toutes une même tension selon le principe suivant : une partie du panneau charge la batterie à travers un régulateur de charge série à coupure pendant que l'autre partie est branchée directement à travers une D.N.R à la batterie et la charge en permanence.

II .11.2.8 Régulateur de charge parallèle :

Ce type de régulateur est utilisé en dérivation sur le panneau solaire et permet de dissiper l'énergie excédentaire sous forme calorifique grâce à des composants de puissance selon le principe suivant :

Le transistor est bloqué lorsque la tension de la batterie est faible, le courant étant faible, la tension aux bornes de la résistance r est faible et tout le courant délivré par le générateur charge la batterie. Le courant I augmente brusquement si la tension aux bornes de la diode ZENER atteint la valeur de référence et avec la tension aux bornes de la résistance r ; suite à cela le transistor T devient passant une partie du charge.

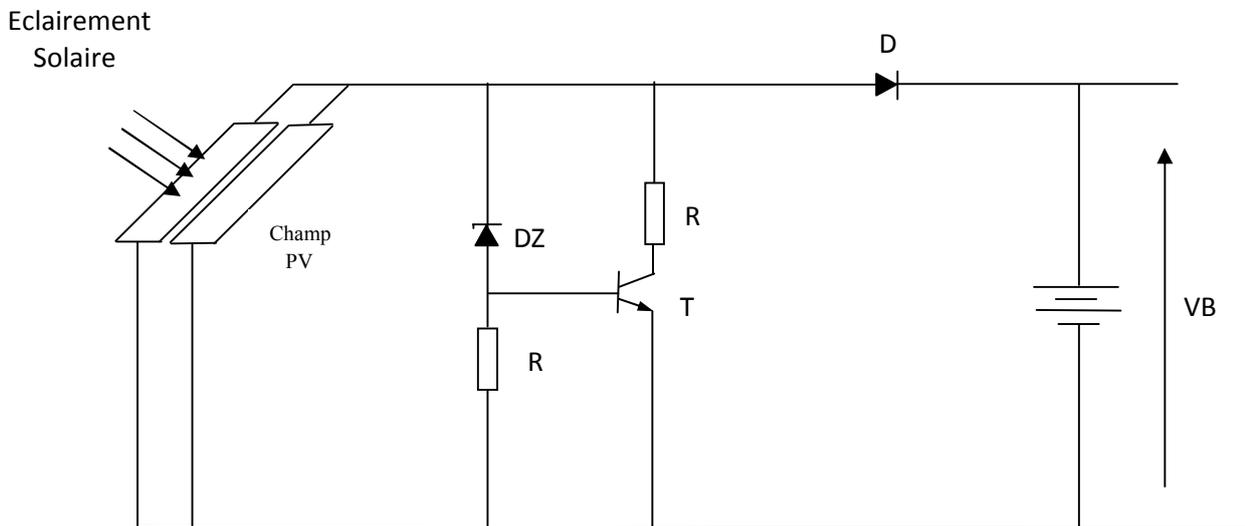


Figure II.27 : Schéma de principe d'un régulateur de charge parallèle.

II.11.2.9 Qualités d'un régulateur :

Un bon régulateur doit avoir les qualités suivantes :

- Simplicité ;
- Faible consommation propre ;
- Faible cout.

II.12 configuration du système retenu pour notre étude

Le schéma de principe du type de système que nous allons étudier est représenté sur la figure II.29, il comprend les sous systèmes suivants :

- Champ de modules photovoltaïques (captage) ;
- Batteries d'accumulateurs électrochimiques ;
- Un redresseur (convertisseur AC-DC) ;
- Un onduleur (convertisseur DC-AC) ;
- Un générateur diesel (appoint).

Champ de modules photovoltaïque

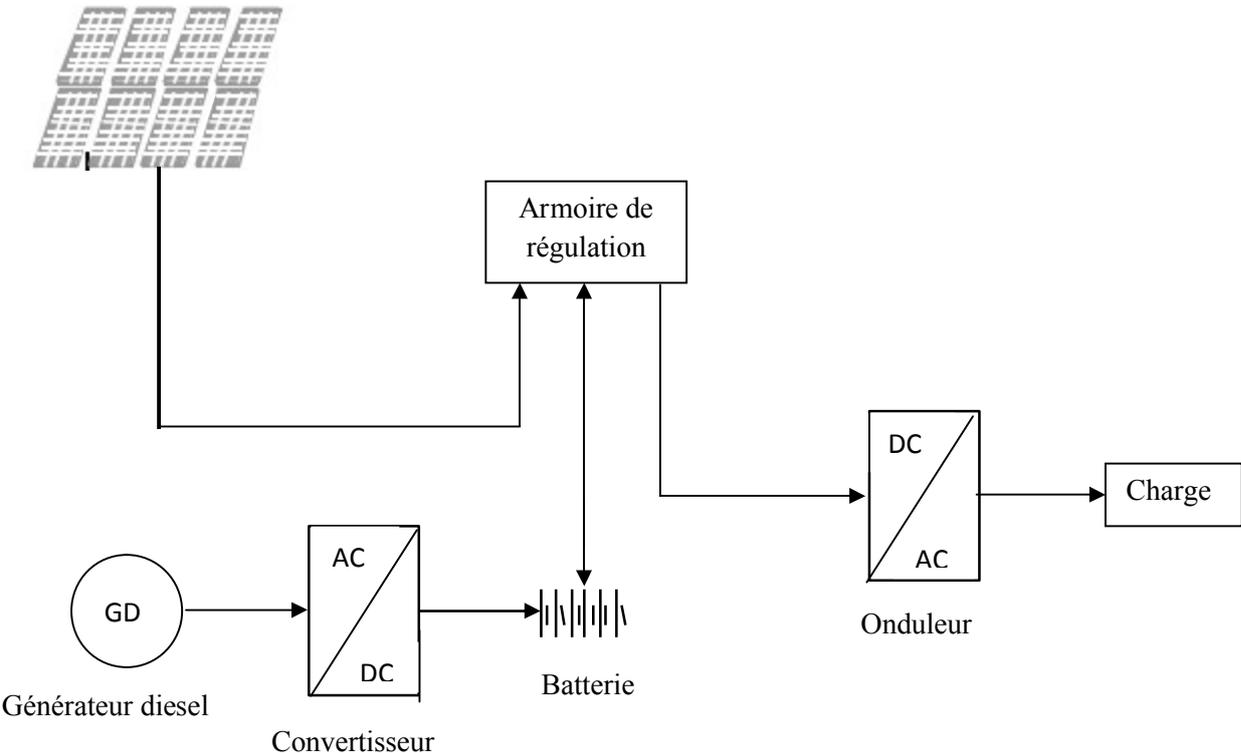


Figure II.29 : Schéma de principe de la configuration du système photovoltaïque retenu.

Conclusion:

L'électricité solaire photovoltaïque est l'une des disciplines mondiales les plus importantes dans le développement durable, actuellement malgré la maîtrise de la technologie de fabrication des cellules solaires et leur encapsulation photovoltaïque, l'électricité solaire reste encore chère ; la maîtrise de la technologie seule ne suffit plus à la diminution des coûts des installations PV, s'ajoute à cela les techniques de dimensionnement utilisées. Alors un très bon dimensionnement des installations PV peut minimiser le coût du Watt-crête vendu.

Le dimensionnement du champ PV demande toute une connaissance des performances des générateurs photovoltaïques utilisés (modules et cellules) et leur comportement en fonction des conditions environnementales (éclairage, température, humidité...).

Chapitre III : Aspect théorique de la modélisation

Introduction

Comme l'énergie solaire disponible en un site varie au cours du temps, cela implique qu'un tel système photovoltaïque va se trouver en permanence en régime transitoire. Ce mode de fonctionnement du système photovoltaïque entraîne des risques permanents de désadaptation de certains composants entre eux, dont il faut tenir compte lors de la conception.

Pour cela, afin d'assurer un fonctionnement adéquat de l'installation photovoltaïque, le concepteur doit définir des règles de pilotage et de contrôle, caractérisées par une série de valeurs de consigne, permettant de déclencher des suites d'opérations. La prise en compte de l'ensemble de ces phénomènes, lors d'un dimensionnement, ne peut être réalisée qu'après une simulation de fonctionnement de tout le système par pas de temps (de l'ordre d'une heure par exemple).

C'est dans cette optique, qu'on développe dans ce chapitre, différents modèles mathématiques, qui décrivent les différents éléments composant notre système.

III.1 Calcul du rayonnement solaire incliné

L'absence des stations de mesure au niveau des sites d'implantation des générateurs photovoltaïques nous oblige d'utiliser un modèle de calcul basé sur des méthodes semi empiriques pour calculer le rayonnement solaire reçu au niveau du sol.

Les paramètres du modèle utilisé dépendent de :

- Les coordonnées géographiques du site (la latitude, l'altitude et longitude) ;
- La saison de l'année et l'heure du jour ;
- L'albédo d'endroit d'installation [8].

III.1.1 Coordonnée géographique

La position d'un point quelconque dans le globe est définie par sa latitude (φ), sa longitude L et son Altitude. La latitude (φ) est l'angle formé par le plan équatorial avec le rayon joignant le centre de la terre à ce lieu. Il est compris entre -90° et $+90^\circ$.

Longitude (L) est l'angle entre le plan méridien passant par le point avec le plan méridien retenu comme origine méridienne de Greenwich. L'altitude correspond à la distance verticale entre ce point et une surface référence qui est le niveau de la mer [9].

III.1.2. Grandeurs astronomiques

1) La déclinaison du soleil (δ) :

On appelle déclinaison l'angle formé par la direction du soleil avec le plan équatorial. Elle varie au cours de l'année entre -23.45° et $+23.45^\circ$. Elle est nulle aux équinoxes (21 mars et 21 septembre). La valeur de la déclinaison peut être calculée par la relation [9] :

$$\delta = 23.45 \times \sin[0.980 \times (n + 284)] \quad (\text{III.1})$$

Où n : le numéro du jour de l'année.

2) Le temps solaire vrai TSV :

Les relations se rapportant au mouvement du soleil utilisant le temps solaire vrai TSV 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 [8] :

$$C = TL - TCF \quad (\text{III.2})$$

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 (III.1).

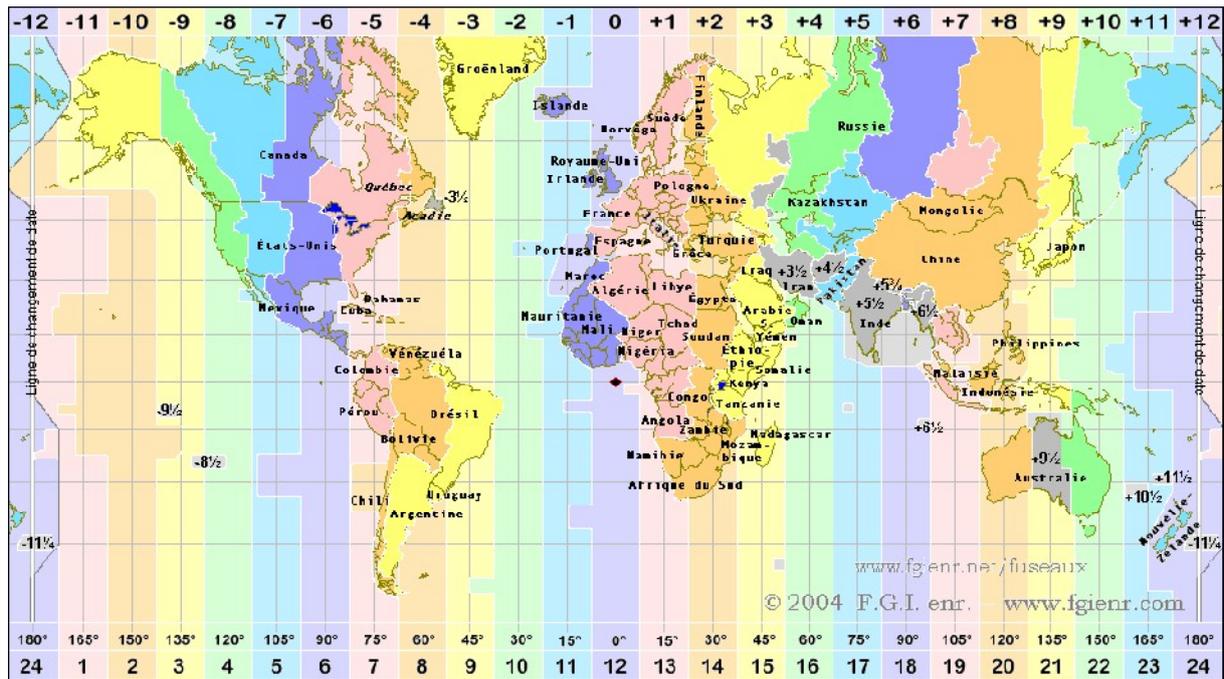


Figure III.1 : fuseaux horaires mondiales.

- 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 [8] :

$$ET = -[0.002 - 0.4797 \times \cos(J) + 3.2265 \times \cos(2 \times J) + 0.0903 \times \cos(3 \times J) + 7.3509 \times \sin(J) + 9.3912 \times \sin(2 \times J) + 0.3361 \times \sin(3 \times J)] \quad (III.3)$$

Avec : $J = 0.984 n$

n : le nombre du Jour de l'année de 1(Premier Janvier) jusqu'à 365(31 décembre).

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

Le temps solaire vrai TSV se calcule finalement par la formule suivante [8] :

$$TSV = TL + ET + \frac{(L_{ref} - L_{lieu})}{15} + C5 \quad (III.4)$$

3) Angle Horaire (ω) :

Définie comme étant 15° fois 1^{er} nombre d'heure de différence avec le midi solaire et affecté du signe positif pour les heures de l'après midi [8].

$$\omega = 15 \times (TSV - 12) \quad (III.5)$$

Avec TSV : le temps solaire vrai.

4) La hauteur angulaire (h) :

C'est l'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur un plan horizontal figure (III.2) [8].

$$\sin(h) = \sin(L - \beta) \times \sin(\delta) + \cos(L - \beta) \times \cos(\delta) \times \cos(\omega) \quad (III.6)$$

Avec :

- L : est la latitude du site ;
- β : est l'angle d'inclinaison du plan par rapport à l'horizontal, $\beta=0$ pour un plan horizontale figure (II.3) ;
- δ : Déclinaison du soleil ;
- ω : Angle horaire.

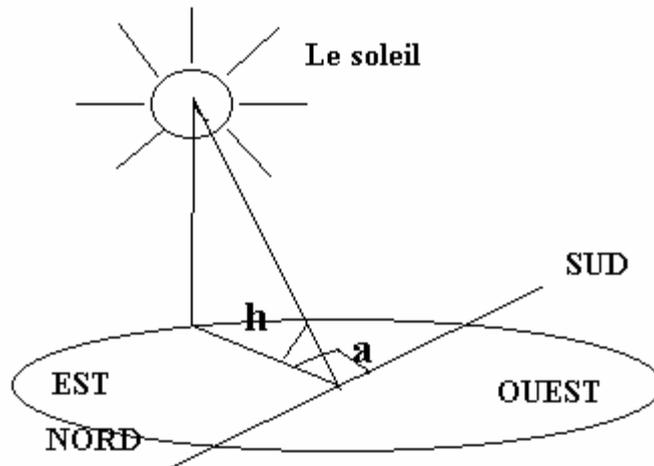


Figure III.2 : Représentation de la hauteur angulaire et l'azimut.

5) L'azimut (a):

C'est l'angle que fait la direction de la projection du soleil sur le plan horizontal avec la direction sud, cet angle étant orienté positivement vers l'Ouest [8] figure (III.2).

$$\sin(a) = \cos(\delta) \times \sin(\omega) / \cos(h) \quad (\text{III.7})$$

6) Angle d'incidence du rayon solaire sur un plan du capteur (θ) :

On se propose de calculer l'angle (θ) entre un rayon arrivant directement du soleil et le plan normal à un plan du capteur [9] figure (III.3) :

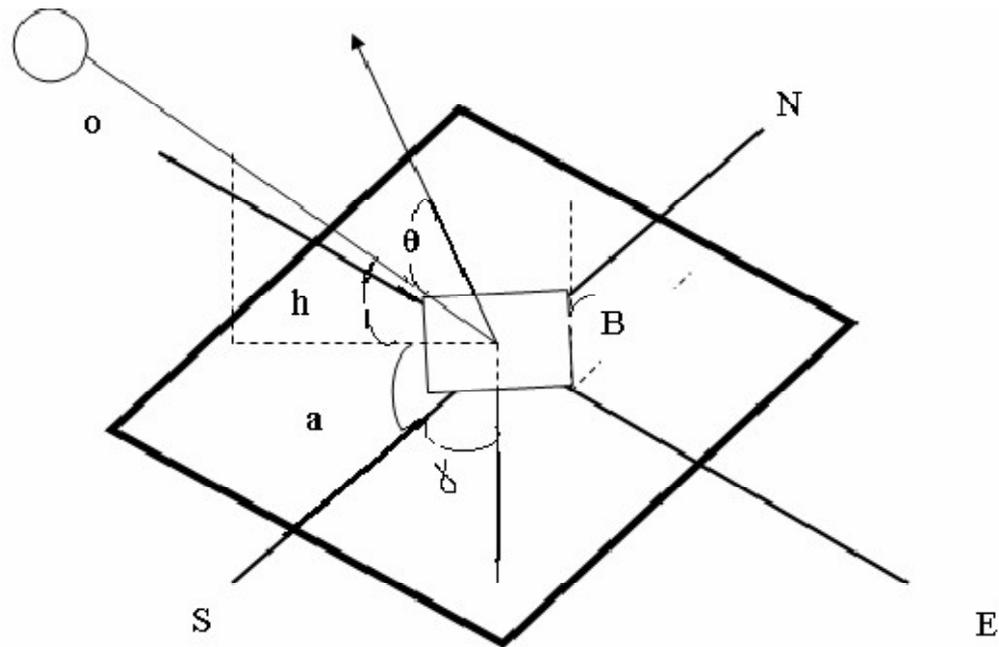


Figure III.3 : Représentation d'angle d'incidence de rayon solaire sur un plan incliné.

$$\begin{aligned} \cos(\theta) = & \sin(\delta) \times \sin(\varphi) \times \cos(\beta) - \sin(\delta) \times \cos(\varphi) \times \sin(\beta) \times \cos(a) + \cos(\delta) \times \cos(\varphi) \times \cos(\beta) \times \cos(\omega) + \\ & \cos(\delta) \times \sin(\varphi) \times \sin(\beta) \times \cos(\omega) \cos(\delta) + \cos(\delta) \times \sin(a) \times \sin(\beta) \times \sin(\omega). \end{aligned} \quad (\text{III.8})$$

Pour une surface orienté vers le sud $\gamma = 0$ et on aura :

$$\cos(\theta) = \sin(\delta) \times \sin(\varphi - \beta) + \cos(\delta) \times \cos(\varphi - \beta) \times \cos(\omega) \quad (\text{III.9})$$

III.1.3 Modèle de LIU JORDAN généralisé :

On a estimé le rayonnement global sur un plan incliné par la relation de **LIU JORDAN** [7] généralisé sous la forme :

$$G = S_h R_b + d \left[\frac{1+\cos\beta}{2} \right] + \rho \left[\frac{1-\cos\beta}{2} \right] \quad (\text{III.10})$$

Avec G: Rayonnement global incliné.

Où l'irradiation directe sur un plan incliné est exprimée par la relation [7] :

$$S_I = S_h \cdot R_b \quad (\text{III.11})$$

Où, le facteur d'inclinaison R_b du rayonnement direct est [7] :

$$R_b = \frac{\cos(L-\beta) \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega + \sin(L-\beta) \cdot \sin\delta}{\cos L \cdot \cos\delta \cdot \cos\omega + \sin L \cdot \sin\delta} \quad (\text{III.12})$$

L'irradiation diffuse sur un plan incliné est [7] :

$$d_f = d_h \left(\frac{1+\cos\beta}{2} \right) \quad (\text{III.13})$$

D'autre part l'irradiation réfléchie sur un plan incliné est estimée par l'expression [7] :

$$d_{ri} = (S_h + d_h) \cdot \left[\frac{1-\cos\beta}{2} \right] \rho \quad (\text{III.14})$$

Avec ρ : Coefficient de réflectivité du sol (Albédo du sol).

Les deux composantes du rayonnement solaire global sur un plan horizontal, sont estimées par le modèle de **PERRIN DE BRICHAMBEAUT [8]** comme suit :

- Rayonnement direct:

$$S_h = A \sin h \cdot \exp \left[\frac{-1}{C \sin(h+2)} \right] \quad (\text{III.15})$$

- Rayonnement diffus:

$$d_h = B(\sin h)^{0.4} \quad (\text{III.16})$$

Où A, B et C sont des constantes qui tiennent compte de la nature du ciel, sont données d'après le tableau suivant [8] :

Nature du ciel	A	B	C
Ciel très clair	1300	87	6
Ciel moyen	1230	125	4
Ciel pollué	1200	187	5

Tableau 1 : coefficient spécifiques selon la nature du ciel.

III.2 Modélisation du module photovoltaïque

III.2.1 Equations de base

La figure (III.4) ci-après représente le schéma équivalent d'un module photovoltaïque.

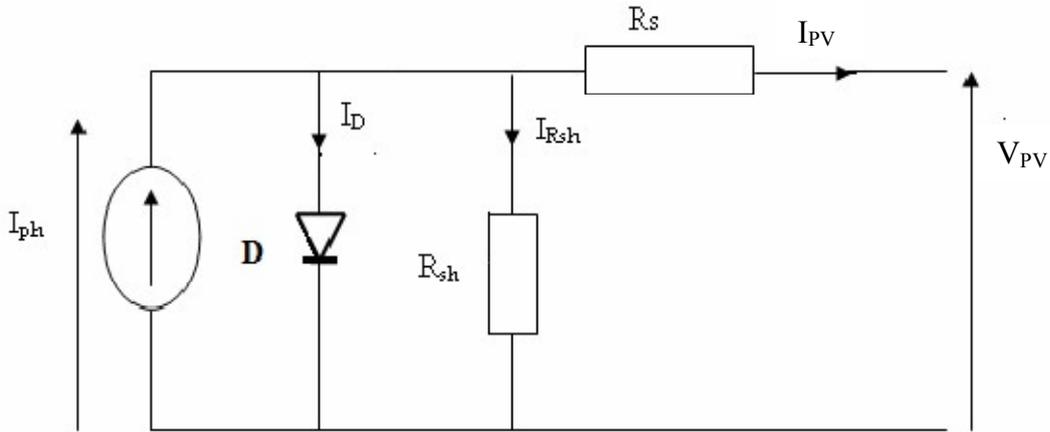


Figure III.4 : Schéma équivalent du modèle à cinq paramètres d'un GPV [20].

Les équations du Courant I_{PV} , V_{PV} sont comme suite [23] :

$$I_{PV} = I_{CC} \left\{ 1 - C_1 \left[\exp \left(\frac{V_{PV} \cdot \Delta V}{C_2 \cdot V_{OC}} \right) - 1 \right] \right\} + \Delta I \quad (\text{III.17})$$

Avec :

$$C_1 = (1 - I_{max}/I_{CC}) \cdot \exp[-V_{max}/C_2 \cdot V_{OC}] \quad (\text{III.18})$$

$$C_2 = \frac{V_{max}/V_{OC} - 1}{\ln(1 - I_{max}/I_{CC})} \quad (\text{III.19})$$

$$V_{PV} = V_{max} \left[1 + 0.0539 \cdot \lg \left(\frac{G_i}{G_i^\circ} \right) \right] + \beta_0 T_M \quad (\text{III.20})$$

$$\Delta V = V_{PV} - V_{max} \quad (\text{III.21})$$

$$\Delta I = \alpha_0 \cdot \left(\frac{G_i}{G_i^\circ} \right) \cdot \Delta T + \left(\frac{G_i}{G_i^\circ} \right) \cdot I_{CC} \quad (\text{III.22})$$

III.3 Modélisation du champ photovoltaïque

Les Figure III.5 et Figure III.6 présentent les caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque de 125 Wcrête produit par Photowatt [25] pour différentes conditions d'ensoleillement et de température.

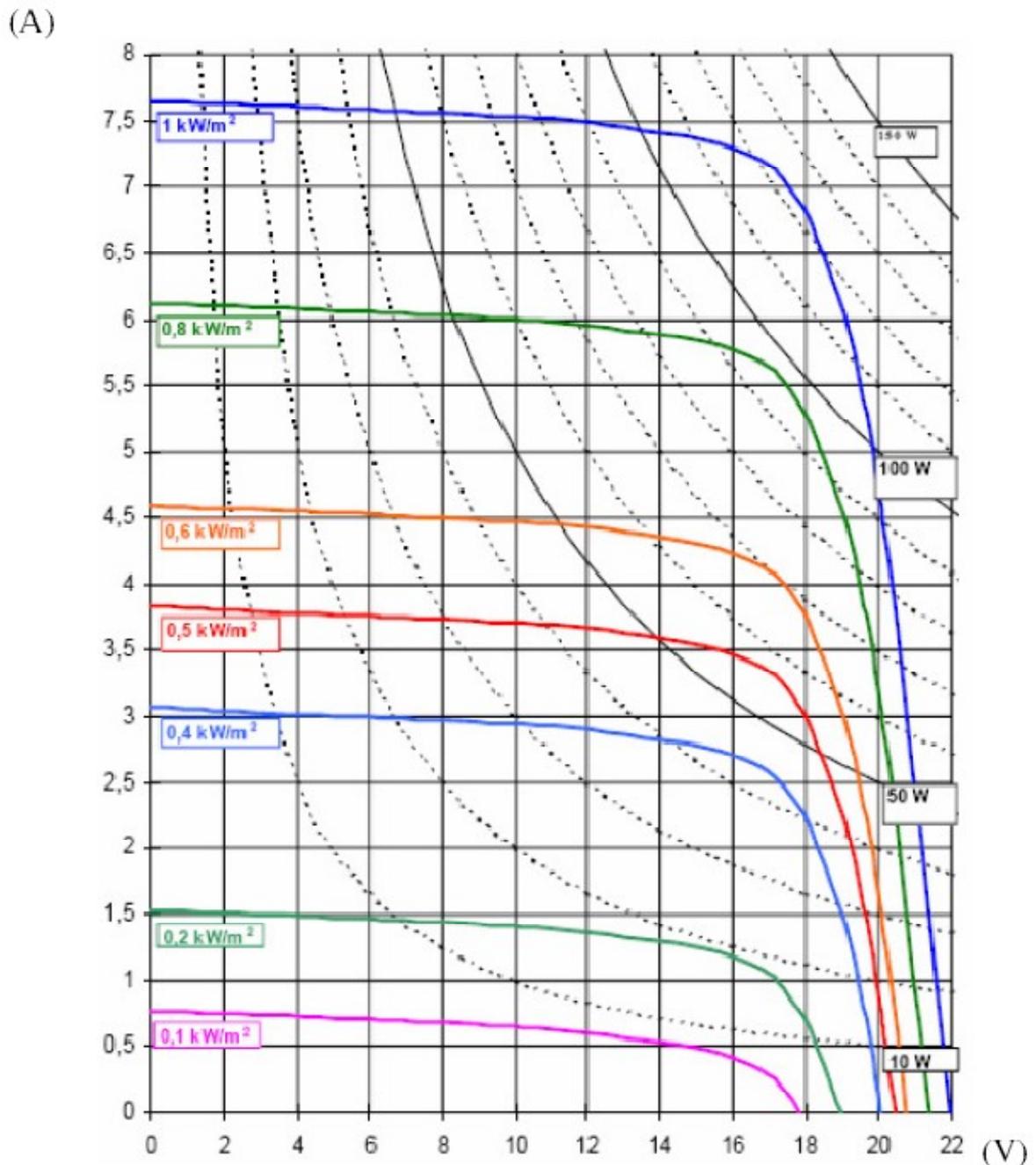


Figure III.5 : caractéristiques I-U d'un module Photowatt PW 6-110 pour différentes irradiances solaires, à 25 °C.

Quand l'ensoleillement croît, l'intensité de court-circuit augmente, les courbes U-I se décalent vers les valeurs croissantes, permettant au module de produire une puissance électrique plus importante. En revanche, quand la température croît, la tension du module en circuit ouvert diminue et la conversion photovoltaïque est donc moins importante (voir figure suivante).

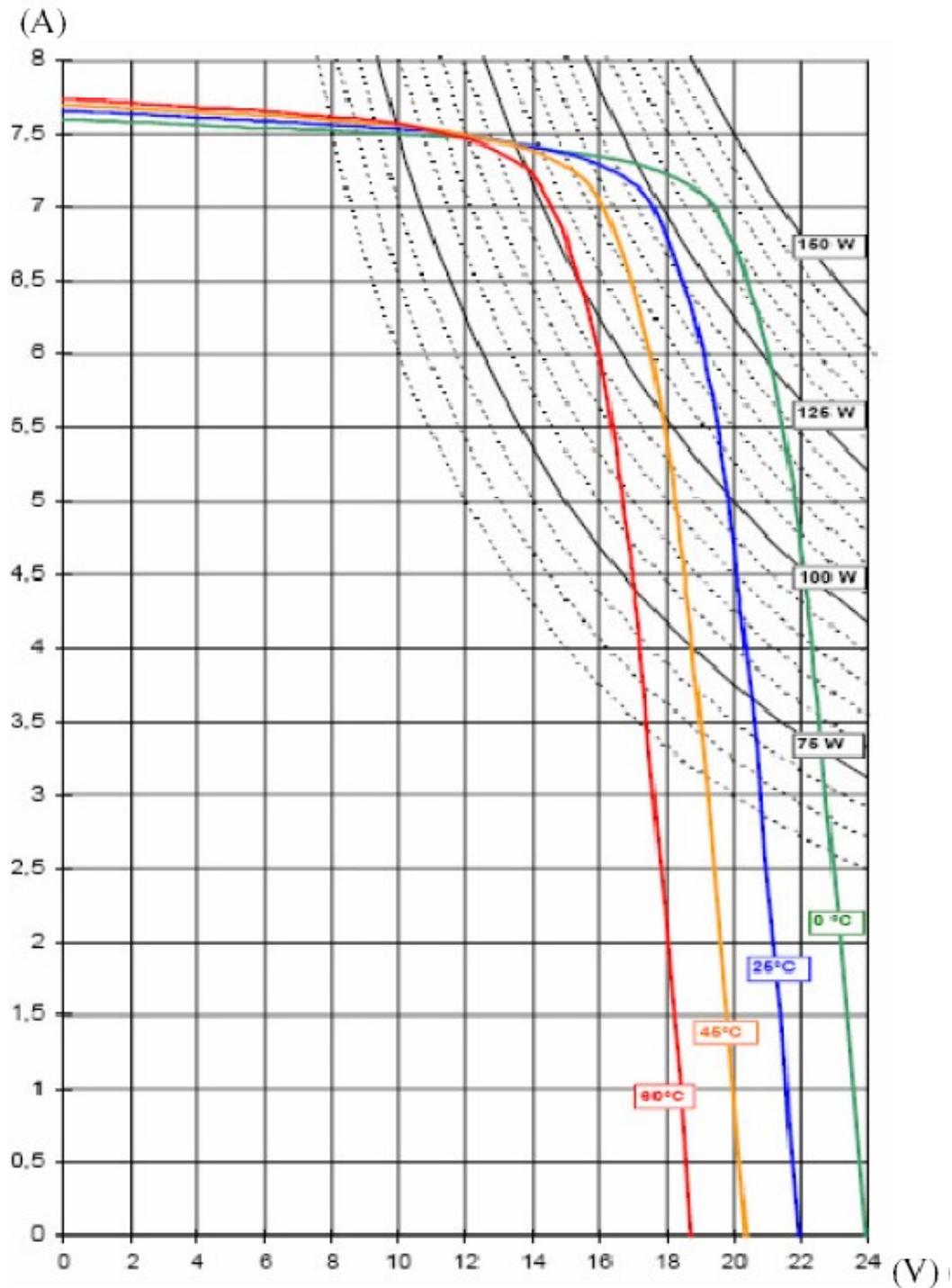


Figure III.6 : caractéristiques I-U d'un module Photowatt PW 6-110 pour différentes températures.

Le comportement des modules photovoltaïques a été largement étudié depuis plus de 20 ans.

Des modèles plus ou moins complexes existent. Le modèle à une diode (empirique) est actuellement le plus utilisé en raison de sa simplicité et de sa qualité de résultats [26]. Il permet d'exprimer l'intensité d'un module PV en fonction de la tension à ses bornes et des conditions climatiques (ensoleillement et température ambiante). Sa validation a déjà été réalisée au Centre d'Energétique et Procédés sur une installation photovoltaïque de 3 kW, à Sophia-Antipolis [26].

Dans les systèmes réels, le champ peut être raccordé à un appareil permettant de tirer parti du maximum de puissance solaire disponible au niveau du champ (MPPT, Maximum Power Point Tracking) en ajustant le niveau de tension sur la courbe caractéristique du module.

L'intégration du module MPPT simplifie les équations présentes dans le modèle à une diode. Une seule équation empirique (équation III.23) permet de connaître, en fonction des caractéristiques du constructeur du module, la puissance maximale P_{max} disponible à ses bornes, dans les conditions d'ensoleillement et de température considérées [22].

$$P_{max} = \frac{G_i}{G_i^\circ} \times [P_{max}^\circ + \mu_{pmax} \times (T_M - T_M^\circ)] \quad (\text{III.23})$$

Avec :

G_i Irradiation solaire globale du lieu considéré (W/m^2) ;

$G_i^\circ = 1000 W/m^2$: Irradiation solaire dans les conditions standards ;

P_{max}° : Puissance maximale du module dans les conditions standards ;

μ_{pmax} : Coefficient de variation de la puissance en fonction de la température ;

T_M : Température de fonctionnement du module en fonction de l'irradiation solaire et de la température ambiante, définie ci-après ;

$T_M^\circ = 25^\circ C$: Température du module dans les conditions standards.

La température de fonctionnement du module est définie par l'équation suivante :

$$T_M = T_{amb} + G_i \times \frac{NOCT-20}{800} \quad (III.24)$$

Avec :

T_{amb} : est la température ambiante ($^{\circ}C$).

NOCT : est la température de fonctionnement des cellules photovoltaïques dans les conditions suivantes : un ensoleillement de $800W/m^2$, une température ambiante de $20^{\circ}C$ et un nombre d'air-masse optique AM égale a 1.

Finalement, la puissance du champ PV composé de N modules s'écrit :

$$P_{MPPT} = N \times P_{max} \quad (III.25)$$

Pour notre étude nous prenons les données du module photovoltaïque PW6-110 produit par photowatt que nous souhaitons simuler sont résumées ci-après :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{max}^{\circ} = 125W_{crete} \\ \mu_{pmax} = -0.43\%/^{\circ}C \\ NOCT = 43^{\circ}C \end{array} \right.$$

III.4 Modélisation du system de stockage d'énergie

Le choix s'est porté sur des accumulateurs au plomb puisque c'est le principal type de batteries aujourd'hui utilisé dans les systèmes avec source photovoltaïque nécessitent du stockage électrique.

Pour ne pas tomber dans un excès de complexité, nous utiliserons le modèle de CIEMAT dont l'avantage est d'être dit « universel » [22].

Ce modèle est basé sur le schéma électrique de figure (III.7), la batterie est alors décrite pas seulement deux élément dont les caractéristiques dépendent d'un certain nombre de paramètres : une source de tension, et sa résistance interne.

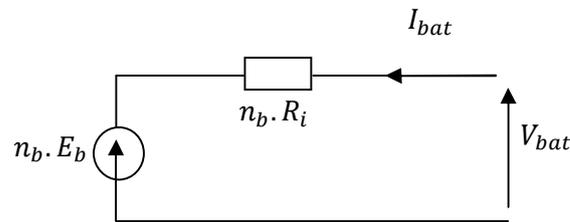


Figure III.7 : schéma électrique équivalent de n_b éléments de batteries en séries [23].

Pour n_b cellules en séries, nous pouvons écrire l'équation :

$$V_{bat} = n_b \cdot E_b + n_b \cdot R_i \cdot I_{bat} \quad (\text{III.26})$$

Où V_{bat} et I_{bat} sont la tension et le courant de batterie (en convention récepteur), E_b la force électromotrice fonction de l'état de charge de batterie noté EDC, R_i la résistance interne d'un élément.

Trois applications sont nécessaires a la description du comportement de la batterie dépendant du régime de charge (indice 'c'), ou décharge (indice 'd').

La formulation de ces équations tient compte de l'expression normalisée de la capacité, C_{bat} de la batterie. L'état de charge, EDC, de la batterie est fonction de la charge résiduelle et du régime de charge ou de décharge.

III.4.1 Modèle de la capacité

C_T représente la capacité limite disponible en décharge quand le courant tend vers 0.

$$C_T = 1.67 \times C_{10} \times (1 + 0.005 \times \Delta T) \quad (\text{III.27})$$

Avec C_{10} : Capacité nominale de la batterie

$$\Delta T = T_{amb} - T_{ref} \quad (T_{ref} = 25^\circ\text{C}) \quad (\text{III.28})$$

ΔT : est l'échauffement de l'accumulateur (suppose identique pour tous les éléments).

La capacité (C_{bat}) totale disponible en fonction du régime de décharge (I_{bat}) est alors donnée par la relation suivante:

$$C_{bat} = C_{10} \times \frac{C_T}{1 + 0.67 \times \left(\frac{I_{bat}}{I_{10}}\right)^{0.9}} \quad (\text{III.29})$$

C_{bat} : sert de référence pour déterminer l'état de charge de la batterie. Ce dernier sera, formulé en fonction de la quantité de charge manquante à la batterie, Q_d .

I_{10} : Courant de décharge en 10h.

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (\text{III.30})$$

L'évolution temporelle de Q_d dépend du mode de fonctionnement de la batterie (croît en décharge, décroît en charge, en convention récepteur). Nous avons alors :

$$Q_d = I_{bat} \cdot t \quad (III.31)$$

Avec : t la durée de fonctionnement de la batterie avec un courant I_{bat} . L'évaluation de l'état de charge par cette relation est appelée coulométrie.

III.4.2 Modèle de la tension

- **En décharge :**

L'expression de la tension de batterie est élaborée à partir de l'équation (III.32) :

$$V_{bat_d} = n_b \cdot [1,965 + 0,12 \cdot EDC] - n_b \cdot \frac{|I_{bat}|}{C_{bat}} \cdot \left[\frac{4}{1+|I_{bat}|^{1.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0,02 \right] \cdot (1 - 0,007 \cdot \Delta T) \quad (III.32)$$

- **En charge :**

$$V_{bat_c} = n_b \cdot [2 + 0,16 \cdot EDC] + n_b \cdot \frac{I_{bat}}{C_{bat}} \cdot \left[\frac{6}{1+|I_{bat}|^{0.86}} + \frac{0.48}{(1-EDC)^{1.2}} + 0,036 \right] \cdot (1 - 0,025 \cdot \Delta T) \quad (III.33)$$

III.4.3 Modèle du rendement faradique

$$\eta_{charge} = 1 - \exp \left[\frac{a}{b + \frac{I_{bat}}{I_{10}}} \times (EDC - 1) \right] \quad (III.34)$$

Où a et b constantes donnée par le constructeur.

Pratiquement, pour la gestion d'énergie du système, il sera plus commode de définir des profils de puissance, d'où l'idée d'imposer une consigne de puissance plutôt que de tension, ce qui permettra de gagner en précision d'évaluation lors de la modélisation et également du suivi d'état de charge. L'évolution du courant est alors calculée à partir de la tension aux bornes de la batterie, V_{bat} :

$$\begin{cases} I_{bat} = \frac{P_{bat}}{V_{bat}} \\ V_{bat} = \eta_b \cdot E + \eta_b \cdot R_i I_{bat} \end{cases}$$

La figure (III.8) nous montre que, en imposant la puissance, l'état de charge de la batterie pourra alors aisément être obtenu par coulométrie.

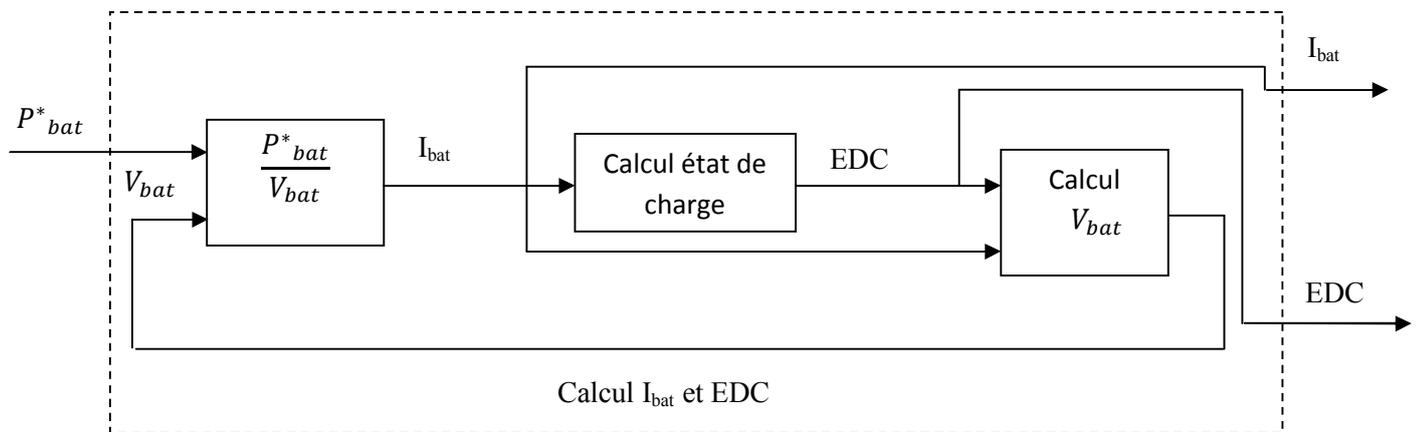


Figure III.8 : Synoptique du calcul du courant et de l'état de charge, dans un mode de fonctionnement à puissance imposée (charge ou décharge).

III.5 Dimensionnement de l'onduleur

L'onduleur est considéré comme un dispositif de transformation en énergie alternative, une énergie de type continu provenant, soit du système de stockage, soit directement du champ photovoltaïque. De tels dispositifs devraient délivrer une tension alternative à fréquence déterminée, le signal généré par ce dernier doit être le plus sinusoïdal possible.

L'onduleur (**monophasé**) est caractérisé par son rendement, qui est fonction de la puissance fournie à l'utilisation de sortie, donnée par la relation :

$$P_c = \frac{p_s}{p_b} \quad (\text{III.35})$$

$$P_c = A1 \cdot \exp\left[-\left(\frac{p_s}{p_n}\right)\right] \quad (\text{III.36})$$

A1 : constante qui est donnée par le constructeur.

P_s : puissance absorbe par l'utilisation.

P_n : puissance nominal.

La puissance a vide est 2.1% la puissance fournie à la sortie de l'onduleur est :

$$P_c = \eta_c \cdot P_b \quad (\text{III.37})$$

$$P_c = \eta_c \cdot P_g \cdot n_g \quad (\text{III.38})$$

III.6 Générateur diesel

Le générateur diesel est en général constitué d'un moteur diesel et d'un générateur synchrone. Le modèle dynamique complet du groupe électrogène diesel suppose la modélisation du moteur diesel avec la boucle de réglage de la vitesse et du générateur synchrone avec le système de réglage de la tension.

III.6.1 Moteur diesel et régulateur de vitesse

Le moteur diesel sont les moteur à combustion interne les plus efficace. La vitesse de rotation d'un tel moteur dépend de la quantité de carburant injecte et de la charge appliquée au vilebrequin du moteur. Le moteur diesel est un système non linéaire. Il présente des temps morts et des retards, ce qui rend difficile son contrôle. Les moteurs diesels sont munis d'un régulateur de vitesse : mécanique, électromécanique ou électronique. Celui-ci réalise le contrôle automatique de la vitesse du moteur diesel, en réglant l'injection de carburant en fonction de la charge. Il s'agit sur le d'accélération, en fonction de la charge. Il agit sur le mécanisme d'accélération, en fournissant le carburant sans variations abruptes et répond en finesse aux variations de charge.

Le diagramme bloc d'un moteur diesel simplifié et celui de régulateur de vitesse respectivement sont illustres par la figure (III.9) :

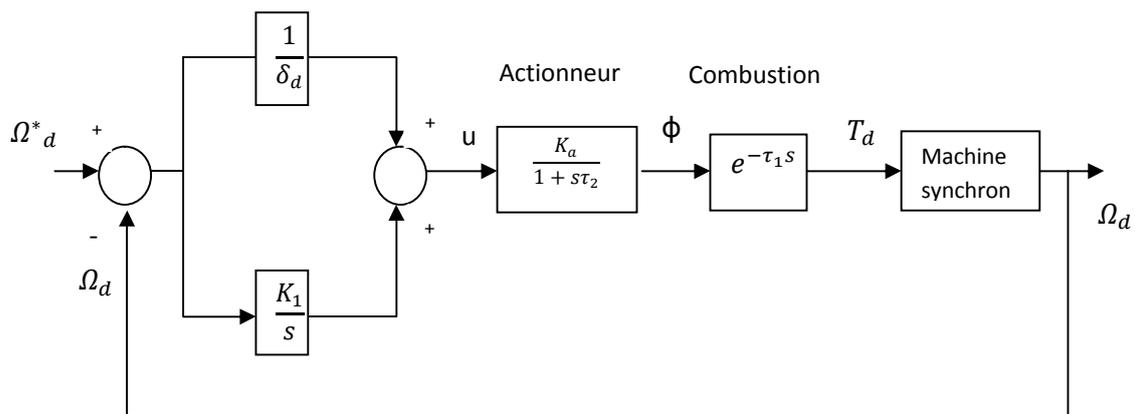


Figure III.9 : bloc- diagramme d'un moteur diesel simplifié et du régulateur de vitesse.

Le bloc-diagramme est partagé en trois :

- **Régulateur de vitesse** : les paramètres de régulateur de vitesse sont le statisme δ_d et le facteur d'intégrateur K_I . L'objectif de l'intégrateur est d'éliminer l'erreur statique la vitesse.
- **L'actionneur** : il est rapproché par un modèle du premier ordre avec le gain K_a , qui adapte la relation entre le couple et la consommation de carburant et une constante de temps τ_2 . Cette constante de temps dépend de la température du carburant.
- **Le bloc combustion** : il inclut un retard qui représente le temps nécessaire pour que le moteur diesel réponde à une demande de modification du taux d'injection de carburant. ce temps mort τ_1 est le résultat de plusieurs cylindres qui ne sont pas tous dans la position permettant d'accepter plus de carburant à un instant donné.

III.6.1.1 Modèle simplifié de la machine synchrone :

La puissance mécanique fournie en sortie du bloc « moteur diesel » est convertie en puissance électrique par un modèle simplifié de la machine synchrone. Les parties mécaniques et électriques de la machine sont modélisées dans le même bloc.

Le rotor de la machine synchrone est constitué d'un enroulement parcouru par un courant d'excitation I_e continu créant un champ magnétique $2p$ polaire. Il possède donc p paire de pôles. Le même nombre de pôle se retrouve dans le stator. ses enroulements sont le siège de courants alternatifs triphasés. La liaison entre la pulsation w_g du champ magnétique tournant et la vitesse de rotation est :

$$\Omega = \frac{w_g}{p} \quad (\text{III.39})$$

Avec :

$$w_g = 2\pi f$$

f : la fréquence des courants alternatifs en HZ.

Un enroulement de l'induit (stator) soumis au champ magnétique tournant de l'entrefer est le siège d'une force électromotrice $e(t)$ de valeur efficace E :

$$E = KN\Phi'pn_s = KN\Phi pn_s = K'\Phi'n_s \quad (\text{III.40})$$

K : coefficient de Kapp (caractéristique de la machine).

N_a : nombre de conducteurs d'une phase de la machine (1 spire=2conducteur).

Φ' : flux maximum à travers un enroulement [wb].

n_s : vitesse de rotation [rpm].

$K'=KNp$: constante globale (caractéristique de la machine).

Le modèle équivalent d'un enroulement du générateur synchrone est montré dans la figure (III.10) :

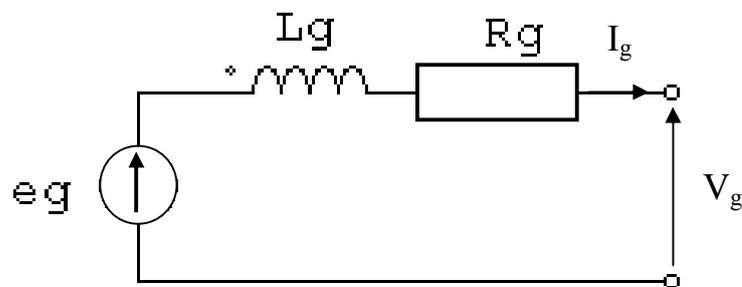


Figure III.10 : Le modèle équivalent d'un enroulement du générateur synchrone.

e_g : f.é.m. à vide[v].

V : tension aux bornes d'un enroulement de la machine[v].

R_g : résistance de l'enroulement[Ω].

L_g : inductance synchrone [H]

La loi des mailles pour le schéma présente dans la figure avec les grandeurs instantanées est :

$$e_g = v_g + l_g \frac{di_g}{dt} + R_g i_g \quad (\text{III.41})$$

En triphasé, le stator comporte trois enroulements et donc trois forces électromotrices $e_{g1}(t)$, $e_{g2}(t)$, $e_{g3}(t)$ de même valeur efficace E et déphasées de $2\pi/3$.

Dans le même model simplifie de la machine synchrone, la partie mécanique sans frottement est décrit par l'équation :

$$J_{ds} \frac{d\Omega_s}{dt} = T_D - T_{em_g} \quad (\text{III.42})$$

J_{ds} : L'inertie totale de l'ensemble moteur diesel générateur synchrone,

Ω_s : La vitesse de rotation,

T_d : Le couple mécanique sur l'arbre,

T_{emg} : Le couple électromagnétique.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dimensionné et modélisé un système constitué par un générateur diesel, des panneaux PV, et un système de stockage. L'implémentation de ces modèles dans un environnement de simulation adapté (DELFI), permettra d'étudier le comportement des composants en fonction de certains paramètres variable dans le temps qui sont l'ensoleillement et température.

Chapitre IV : Simulation du système.

Introduction

Dans ce chapitre, on va présenter une description globale de notre logiciel, à travers une implantation d'un organigramme générale du fonctionnement. Une description de chaque menu, sous menu et les différentes fenêtres sont ainsi visualisées et discutées. Le développement de ce logiciel est basé sur la version professionnelle de DELPHI 7. C'est un environnement de programmation permettant de développer des applications sous Windows où il fait appel à une conception visuelle.

IV.1 Définition du problème

L'objectif est de trouver une combinaison entre l'apport énergétique de trois sources d'énergie qui sont : le photovoltaïque (panneaux solaire) le diesel (générateur) et le stockage électrochimique (batteries), afin de satisfaire une demande énergétique (la charge) qui est une fonction du temps (jour, saison et année) et de lui assurer une alimentation permanente à tout instant.

A noter que la source d'énergie photovoltaïque (puissance fournie P_f) varie en fonction des données radiométriques, elle-même variable en fonction du temps de la journée, de la saison et de l'année.

IV.2 Données radiométriques

Les données radiométriques nécessaires pour cette étude proviennent du centre de développement des énergies renouvelable.

Compte tenu de l'objectif attribué à cette présente étude et sa spécificité, les données radiométriques nécessaires sont les suivantes, à savoir : les irradiances solaire horaires et les températures ambiantes.

Les tableaux suivants représentent les données radiométriques (ensoleillement et température) du 1^{er} au 4 février 2003, utilisées dans notre programme, et qui nous ont été données du CDER.

Heure (h)	Tableau (A) : 1er journée		Tableau (B) : 2ème journée	
	Température (°C)	Ensoleillement (W/m ²)	Température (°C)	Ensoleillement (W/m ²)
00:00	5.03	0.33	5.8	0.00
01:00	5.65	1.00	5.21	0.00
02:00	6.18	0.00	4.98	0.00
03:00	4.91	1.16	4.16	0.00
04:00	5.55	1.00	3.61	0.00
05:00	5.91	0.00	4.05	0.00
06:00	6.11	0.00	4.16	0.00
07:00	3.36	1.00	4.23	0.00
08:00	4.76	1.33	4.40	0.16
09:00	4.38	10.50	4.81	22.5
10:00	4.60	50.66	6.00	224.8
11:00	4.45	143.33	7.43	403.00
12:00	4.68	100.66	9.08	531.16
13:00	3.56	255.00	9.73	713.16
14:00	5.80	430.66	10.11	500.16
15:00	5.35	282.66	9.15	118.5
16:00	5.81	331.66	9.40	72.66
17:00	7.06	291.83	9.70	69.33
18:00	5.90	57.16	9.91	26.83
19:00	5.63	2.33	9.81	1.16
20:00	6.05	0.00	9.76	0.00
21:00	6.43	0.00	9.28	0.00
22:00	6.33	0.00	8.88	0.00
23:00	5.05	0.00	8.78	0.00

Tableaux IV.1

Tableau (C) : 3 ^{ème} journée			Tableau (D) : 4 ^{ème} journée	
Heure (h)	Température (°C)	Ensoleillement (W/m ²)	Température (°C)	Ensoleillement (W/m ²)
00:00	9.05	0.00	11.30	0.00
01:00	9.08	0.00	11.68	0.00
02:00	9.31	0.00	11.65	0.00
03:00	9.68	0.00	11.55	0.00
04:00	9.96	0.00	11.51	0.00
05:00	9.63	0.00	11.20	0.00
06:00	9.70	0.00	11.81	0.00
07:00	9.23	0.00	11.30	0.00
08:00	8.83	1.00	11.10	11.00
09:00	9.63	20.16	11.23	147.66
10:00	10.73	229.16	13.18	368.83
11:00	12.18	402.83	14.88	567.66
12:00	13.36	526.66	15.33	595.66
13:00	13.86	707.75	16.15	630.83
14:00	14.13	619.66	16.21	589.00
15:00	14.11	566.00	15.30	486.00
16:00	14.13	458.00	14.31	321.33
17:00	13.80	299.00	12.78	122.50
18:00	11.65	60.33	12.51	0.00
19:00	11.08	5.33	12.70	0.00
20:00	11.07	0.00	11.91	0.00
21:00	11.07	0.00	10.23	1.83
22:00	10.00	0.00	10.36	2.00
23:00	09.00	0.00	09.00	0.00

Tableaux IV.2

IV.3 Prédétermination du profil énergétique de la demande [26].

Le système hybride présenté est supposé alimenter une charge à usage domestique. Le dimensionnement d'un tel système de production de l'énergie dépend essentiellement du profil de la consommation à satisfaire. La puissance demandée par un foyer de nature donnée n'est pas figée le long de l'année. L'heure de sollicitation maximale du système énergétique par la charge varie en fonction des saisons conséquence à la variation de la durée du jour.

Pour notre part nous ne considérons que la demande en énergie électrique utilisable à des fins d'éclairage, de réfrigération ou d'utilités ménagères.

La figure (IV.1) illustre la demande en énergie électrique journalière d'un foyer rural.

L'équipement le plus fréquemment utilisé se résume à : l'éclairage, la réfrigération, le téléviseur, le poste radio, le sèche cheveux, le fer à repasser et le moulin à café.

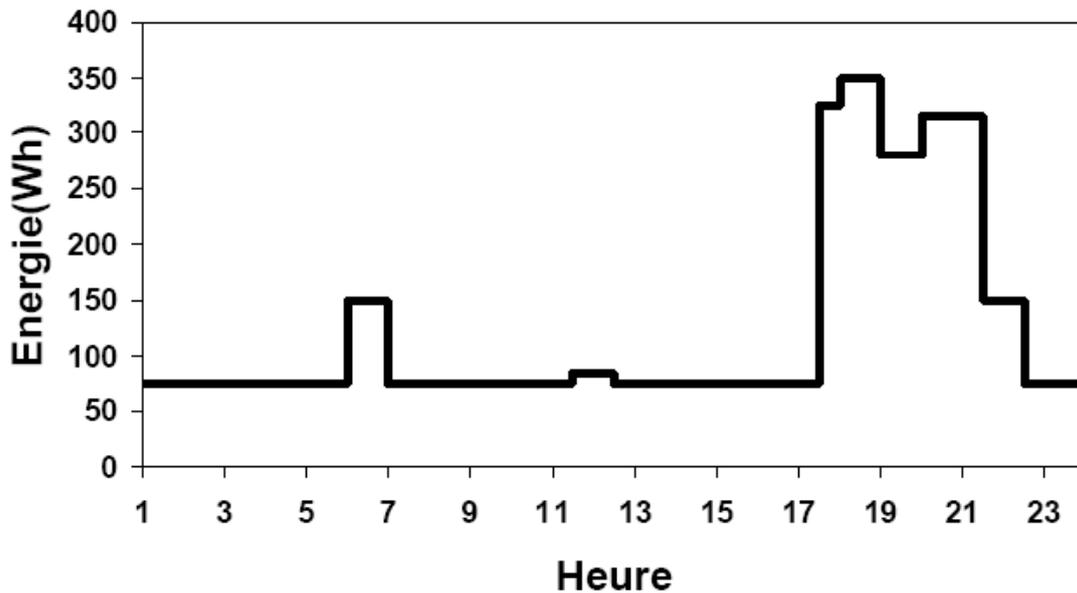


Figure IV.1: Profil type de consommation journalière d'un foyer rural (Bou-Ismail).

Ce qui est le plus remarquable dans ce diagramme est la présence de la pointe d'énergie demandée, située la nuit et une charge de base (réfrigérateur) présente tout le long de la journée.

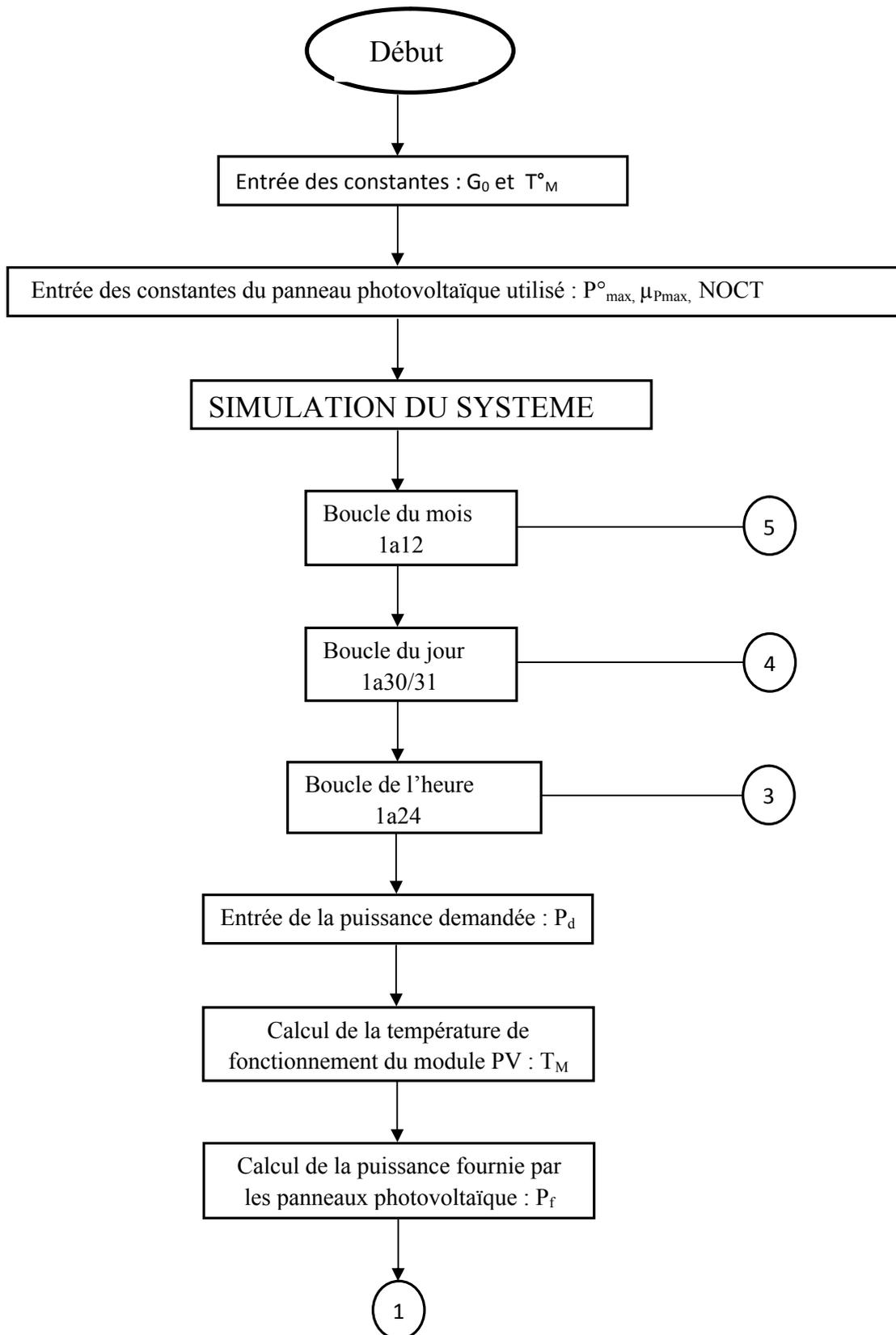
Cette énergie produite par batteries d'accumulateur serait importante si le système n'était composé que d'une source d'énergie photovoltaïque. Mais il est clair que ce stockage sera le plus important pour un système photovoltaïque-batterie où le potentiel solaire est concentré dans la journée ; alors que la demande est plus importante en période nocturne.

IV.4 Présentation du programme de simulation

Le programme de démonstration de notre système ci dessous, a été réalisé avec le logiciel de programmation DELFI 7, c'est un programme qui nous donne pour chaque heure de la journée et cela pendant une année :

- La puissance fournie par le champ photovoltaïque P_f , qui varie en fonction du nombre de panneaux utilisés et des données radiométriques.
- La puissance de la charge (puissance demandée P_d) ;
- L'évolution des courbes des deux puissances (P_f , P_d) en temps réel ;
- L'état de charge et de décharge de la batterie ;
- L'état de marche ou d'arrêt du générateur diesel.

IV.4.1 Organigramme



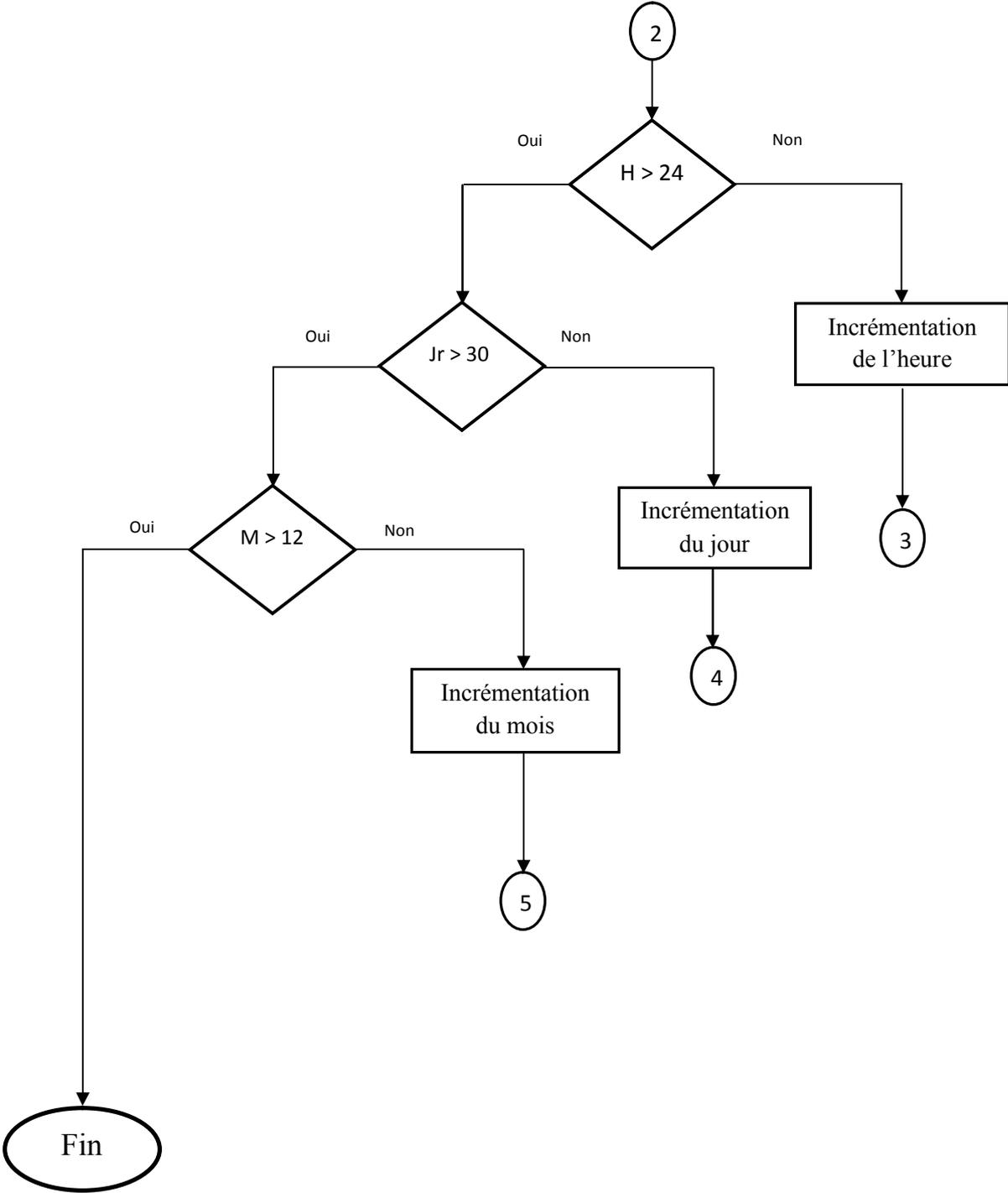


Figure IV.2 : Structure général de l'organigramme du programme de simulation.

IV.4.2 Présentation des menus et des fenêtres

- **Interface de présentation :**



Figure IV.3 : interface de présentation.

- **Menu principal :**

La figure IV.4 représente le menu principal du logiciel, ce menu nous permet avec une interface graphique de bien comprendre tous les phénomènes qui se passe dans notre système hybride.

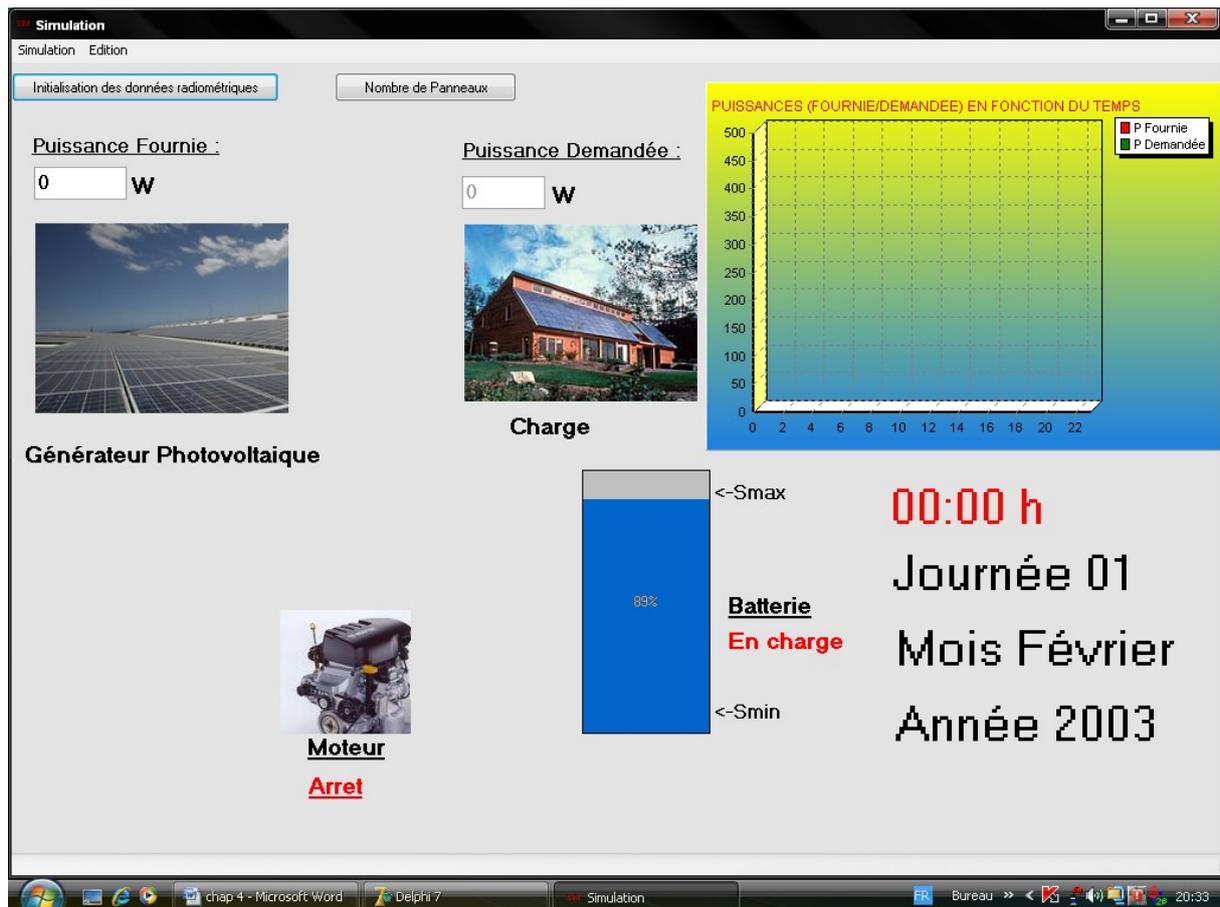


Figure IV.4 : Menu principal.

- **Entrée du nombre de panneaux PV :**

En cliquant sur le bouton **nombre de panneaux** qui apparaît sur le menu principal, une fenêtre apparaît pour choisir le nombre de panneaux à mètres en série et en parallèle, pour modéliser notre champ PV.

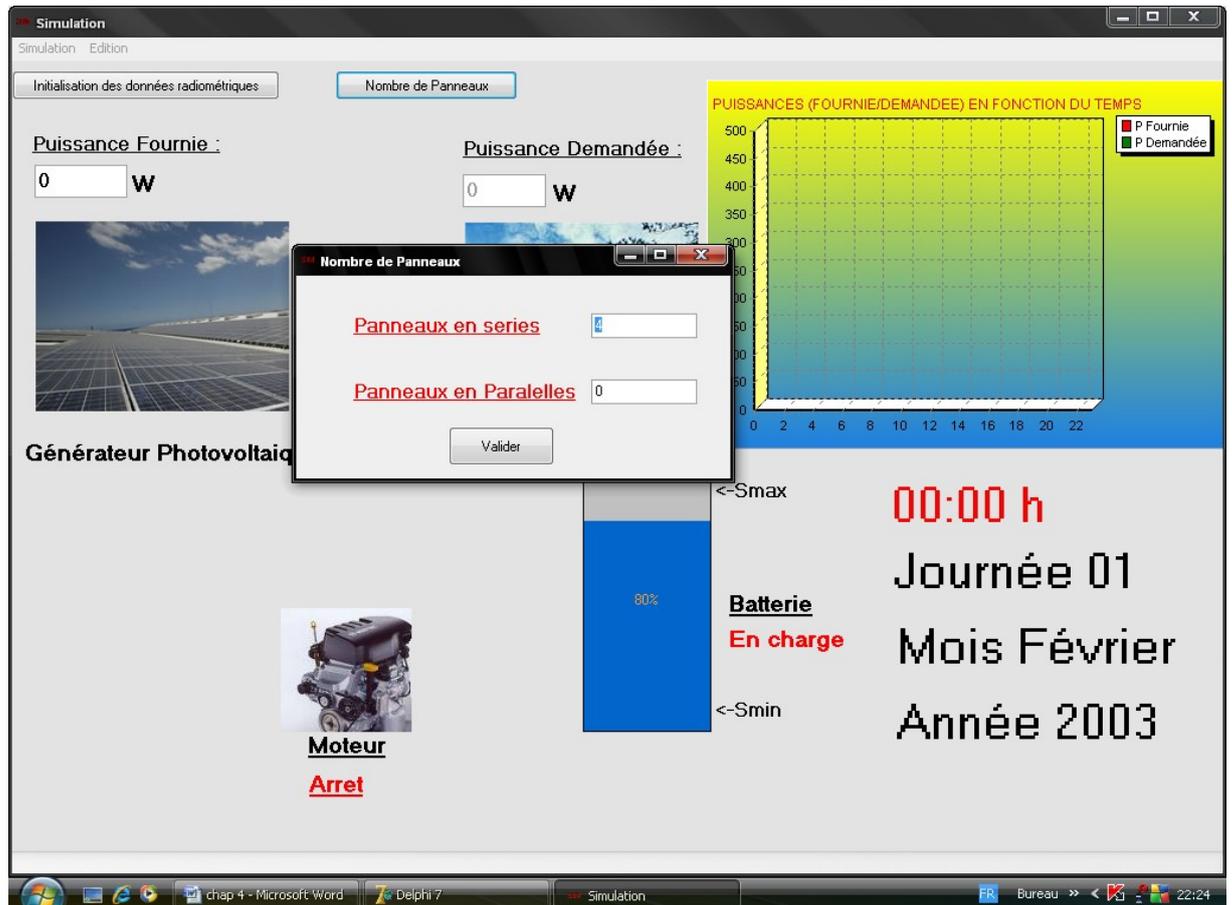


Figure IV.5 : Entrée du nombre de panneaux PV.

- **Entrée des données radiométriques :**

Dans le menu édition, le sous menu **entrée donnée journalière** apparait et qui nous permet d'entrée les données radiométriques (température et ensoleillement), pour une journée.

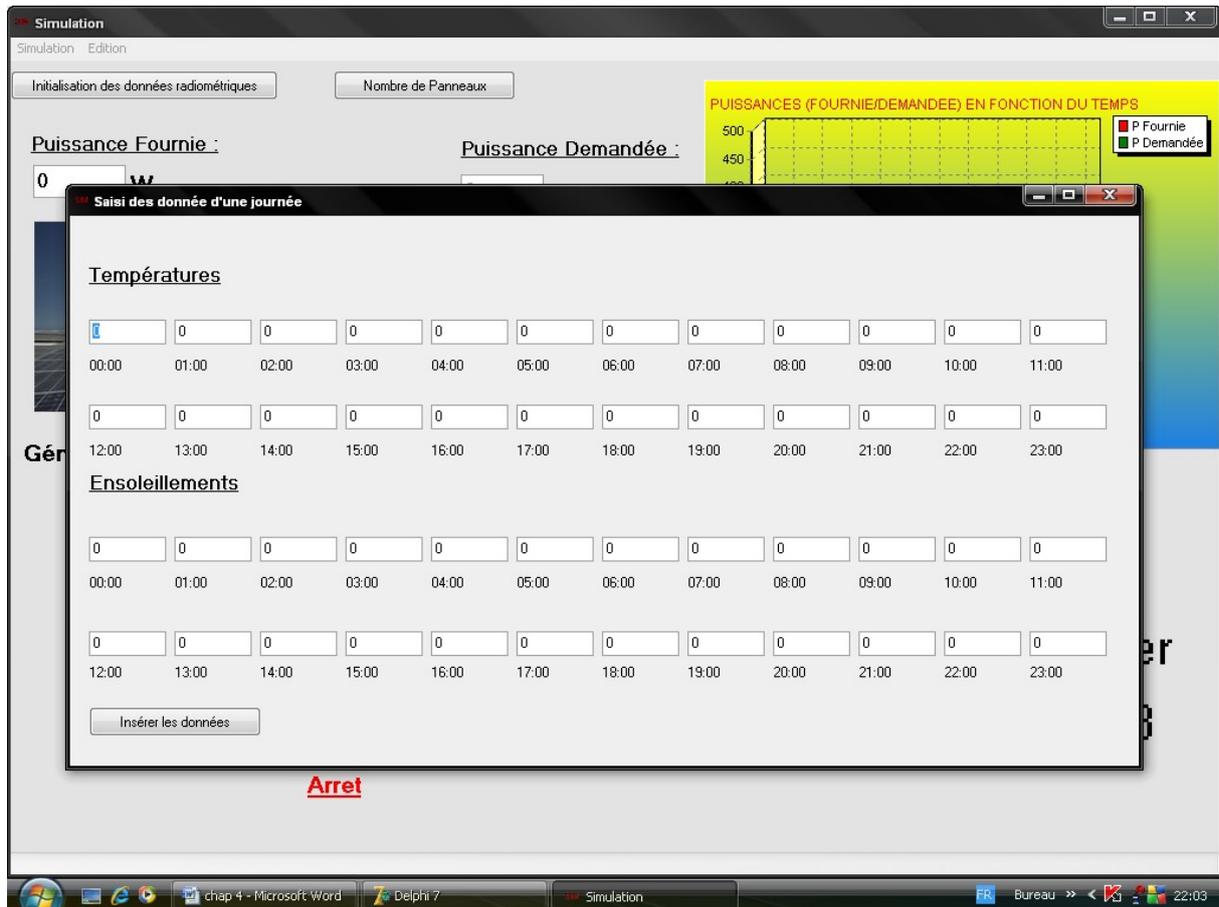


Figure IV.6 : Entrée des données radiométriques.

- **Début de la simulation :**
On clique sur le menu simulation pour **commencer** la simulation.

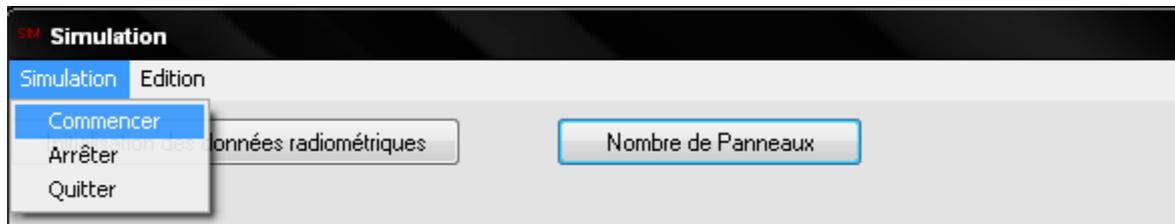


Figure IV.7 : commencer la simulation.

Nous allons dans ce qui suit, montrer et expliqué Les étapes essentielles de la simulation pour des heures bien spécifiques.

▪ A **02:00h** : la Figure IV.8 montre que la puissance fournie par le champ PV est inférieure à la puissance de la charge, ce qui fait que l'alimentation de cette dernière est assurée par la batterie qui joue dans ce cas le rôle de générateur.

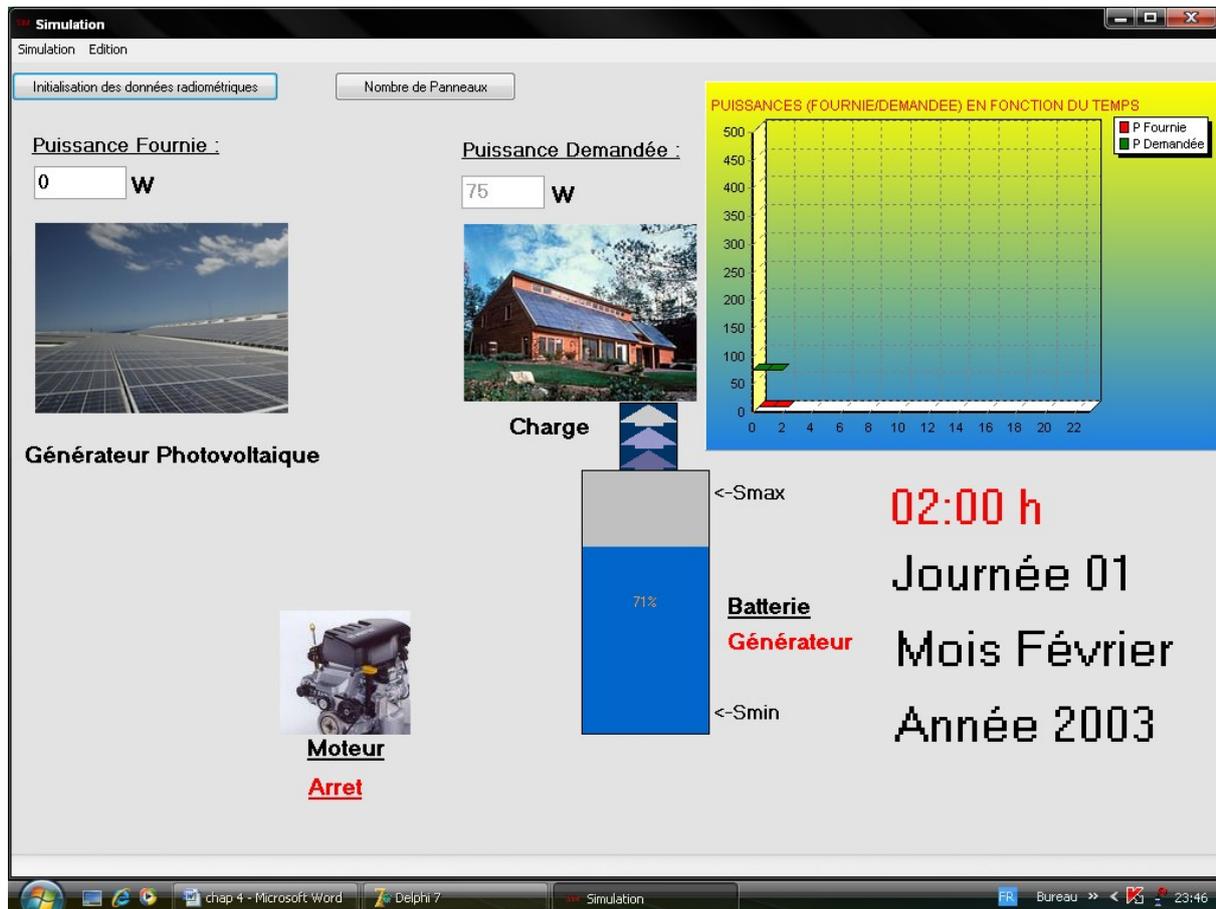


Figure IV.8 : situation a 02:00h.

▪ A **15:00h** : la Figure IV.9 montre que la puissance fournie par le champ PV est supérieure à la puissance de la charge, ce qui fait que le générateur PV alimente la charge et charge la batterie.

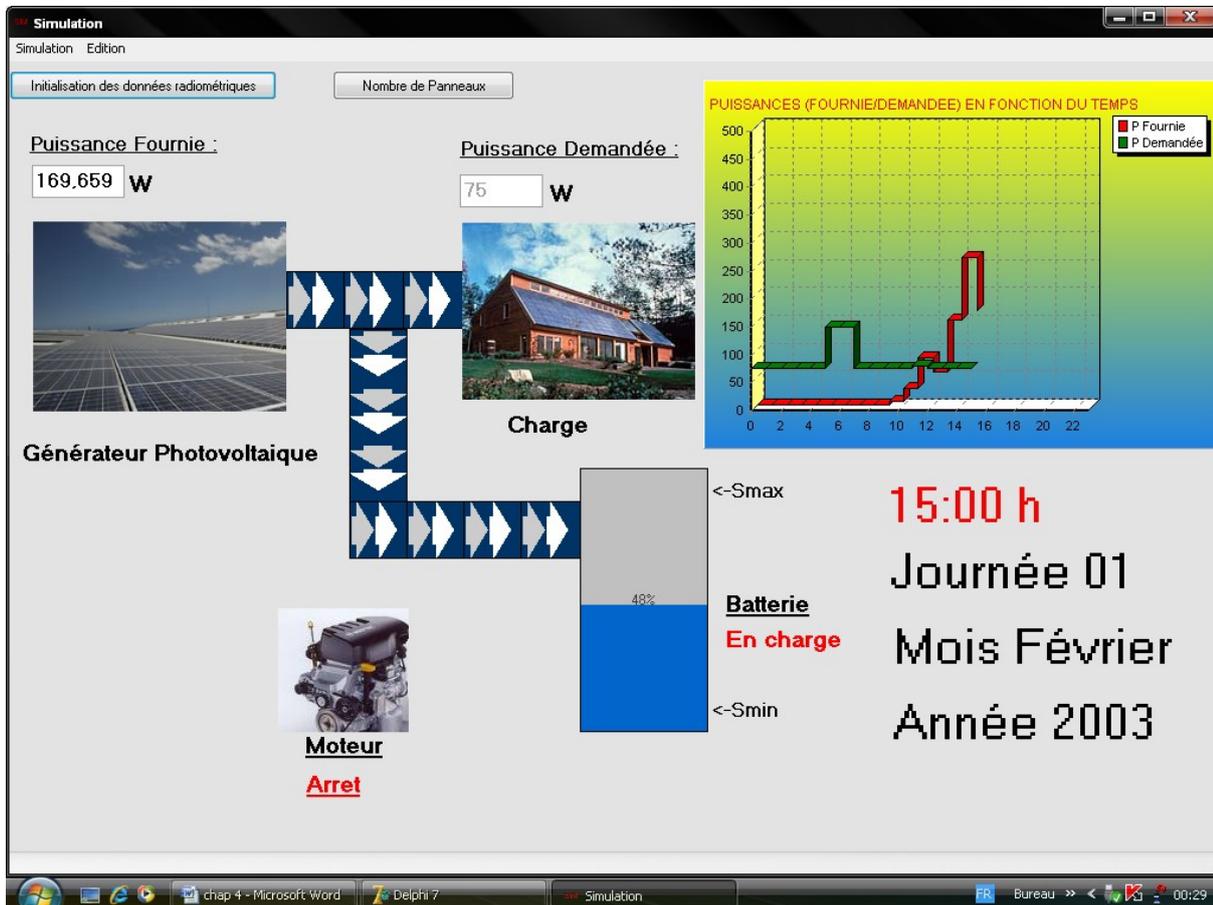


Figure IV.9 : situation a 15:00h.

▪ A **19:00h** : la Figure IV.10 montre que la puissance PV est inférieure à la puissance de charge a cause du manque d'ensoleillement, se qui fait que la batterie se remet à recharger la charge.

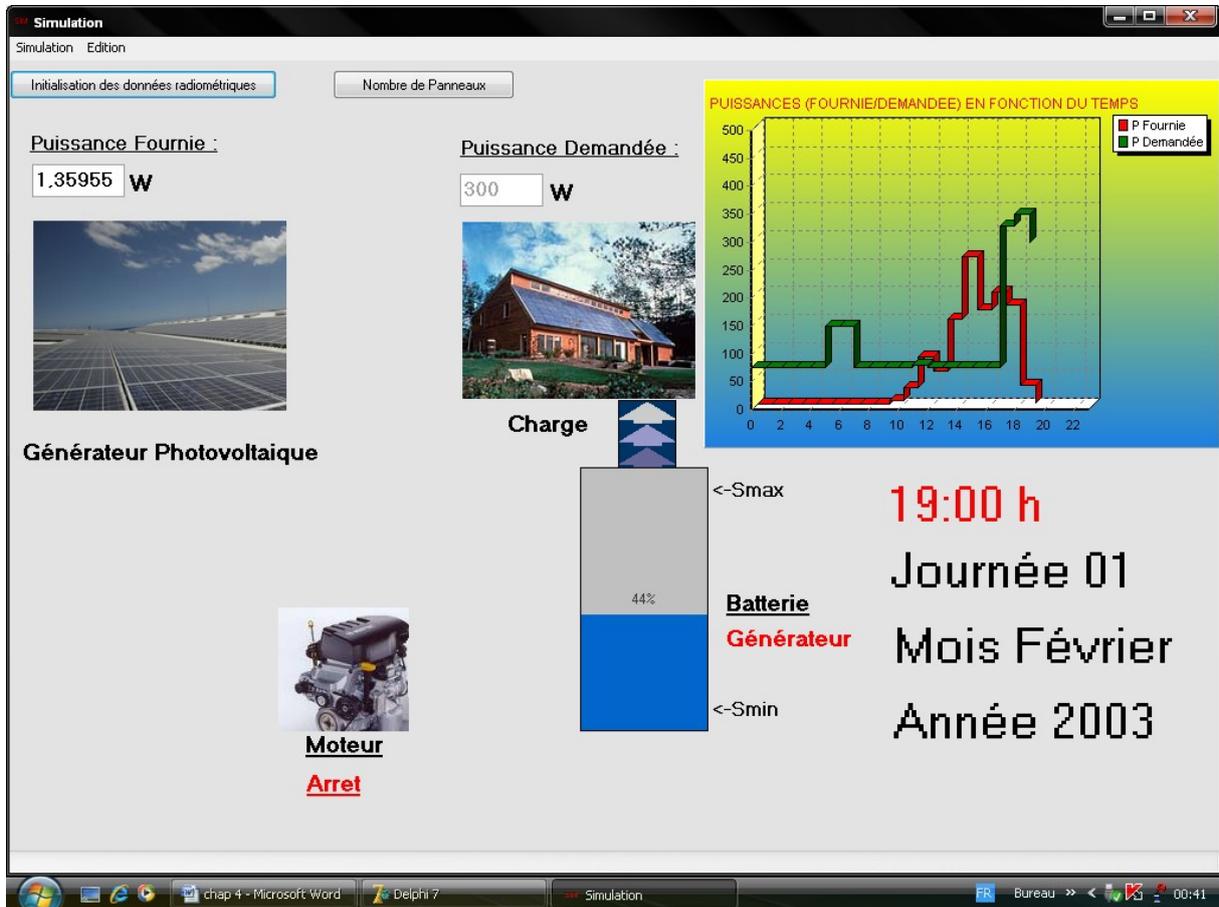


Figure IV.10 : situation à 19:00h.

▪ A 06:00h, journée 2 : la figure IV.11 montre que le seuil critique de la batterie est atteint (en rouge), ce qui fait déclenché automatiquement le générateur diésel pour recharger la batterie.

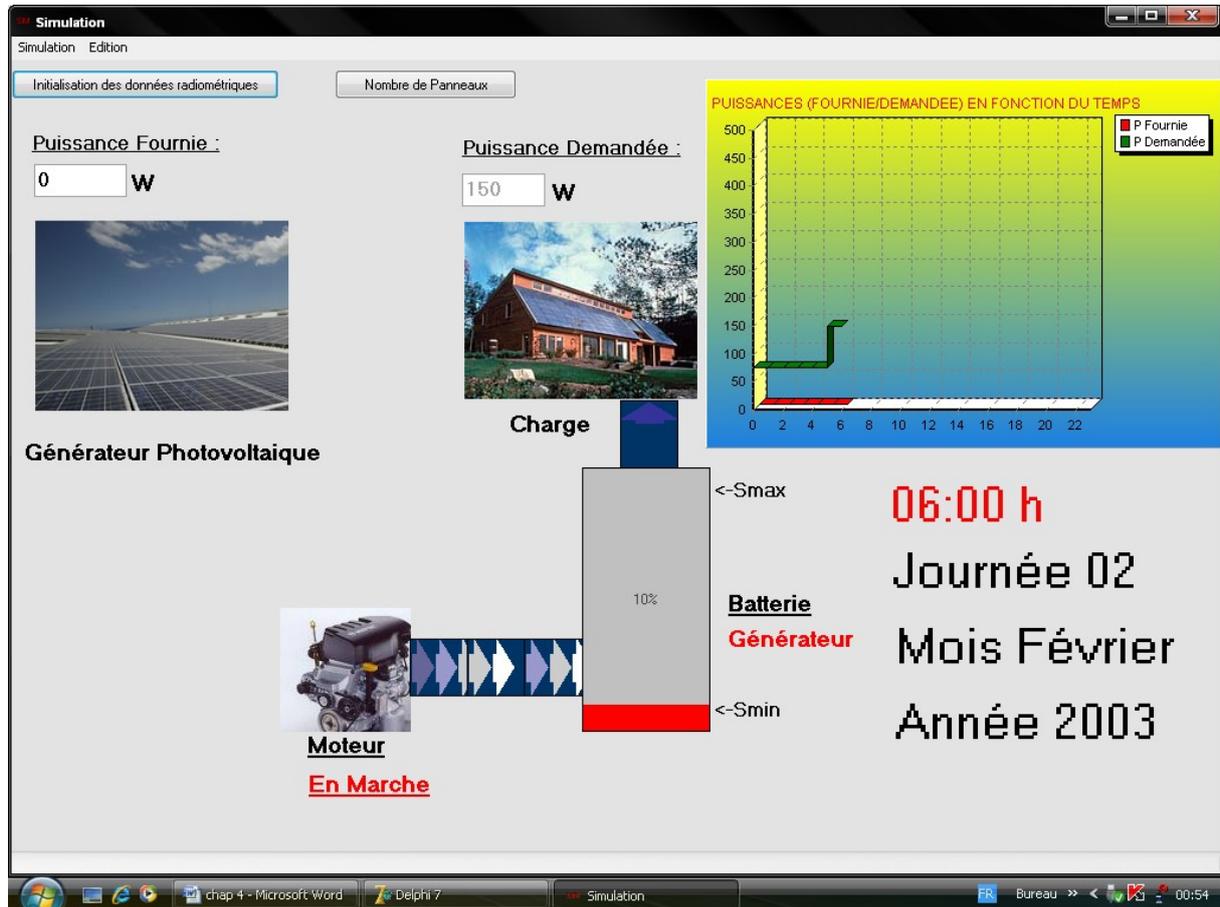


Figure IV.11 : situation a 06:00h.

- A 09:00h, journée 2 : la figure IV.12 montre que la batterie joue le rôle d'un générateur pour alimenter la charge, et se charge au même temps par le générateur diesel, ce qui assure une continuité de l'alimentation de la charge, et c'est le but de notre étude.

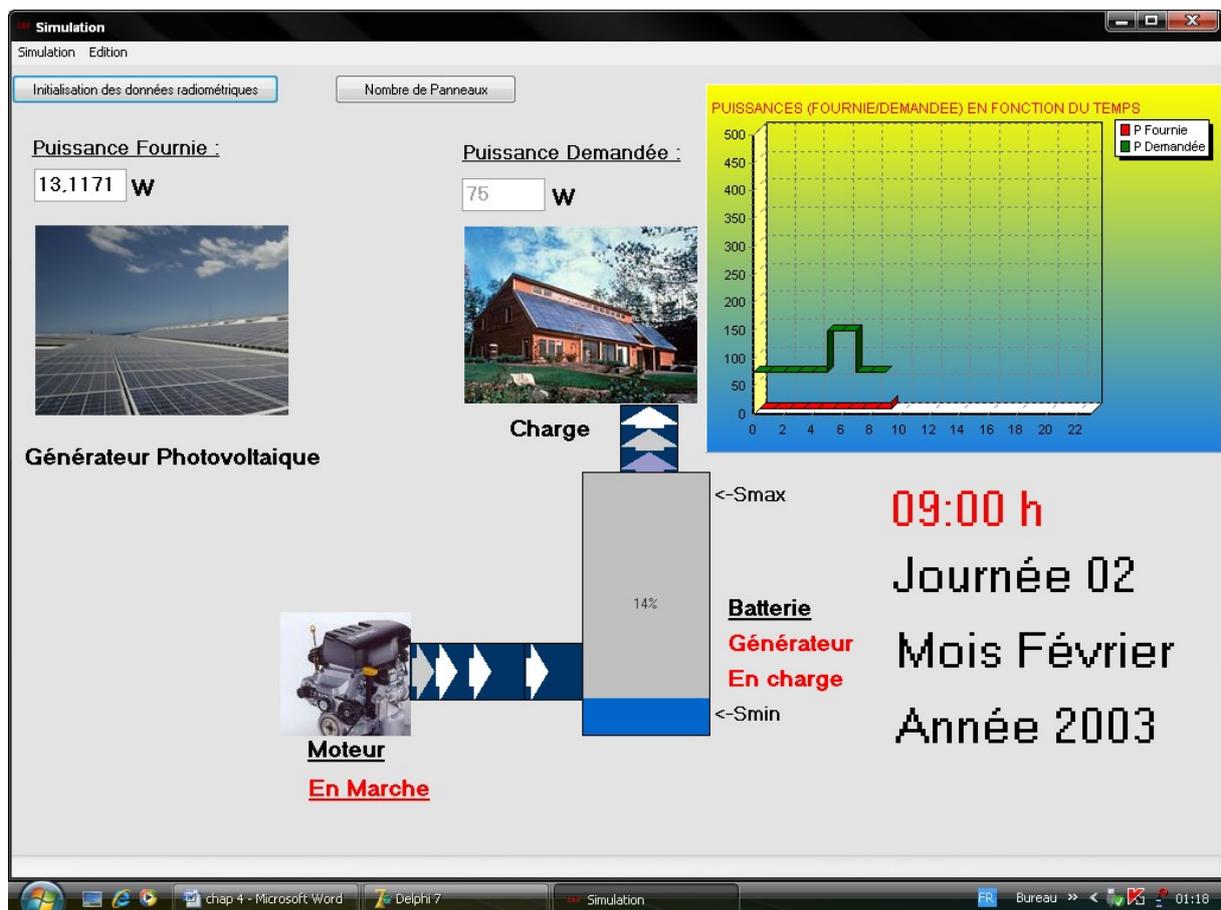


Figure IV.13 : situation a 09:00h.

Conclusion

Ce projet tente de contribuer à la réalisation d'un programme qui permet à la fois la simulation et le dimensionnement simple d'une installation d'un système hybride. Les rôles du logiciel peuvent être résumés comme suit :

- permet de faire des simulations par ordinateur dans le but d'estimer les caractéristiques de l'installation réelle. Ce qui permet de réduire le coût et augmenter la fiabilité du système.
- Faire l'étude du fonctionnement du système pour diverse consommation et sur plusieurs sites.
- Comparée plusieurs configurations de l'installation pour un même site et aussi pour plusieurs charge alimentée par ce système.
- Modélise un élément nouveau pour l'utilisation dans le système.
- permet aussi aux intéressés d'avoir une idée sur l'installation d'un système hybride (photovoltaïque diesel), apprendre sur le fonctionnement du système (rôle didactique).

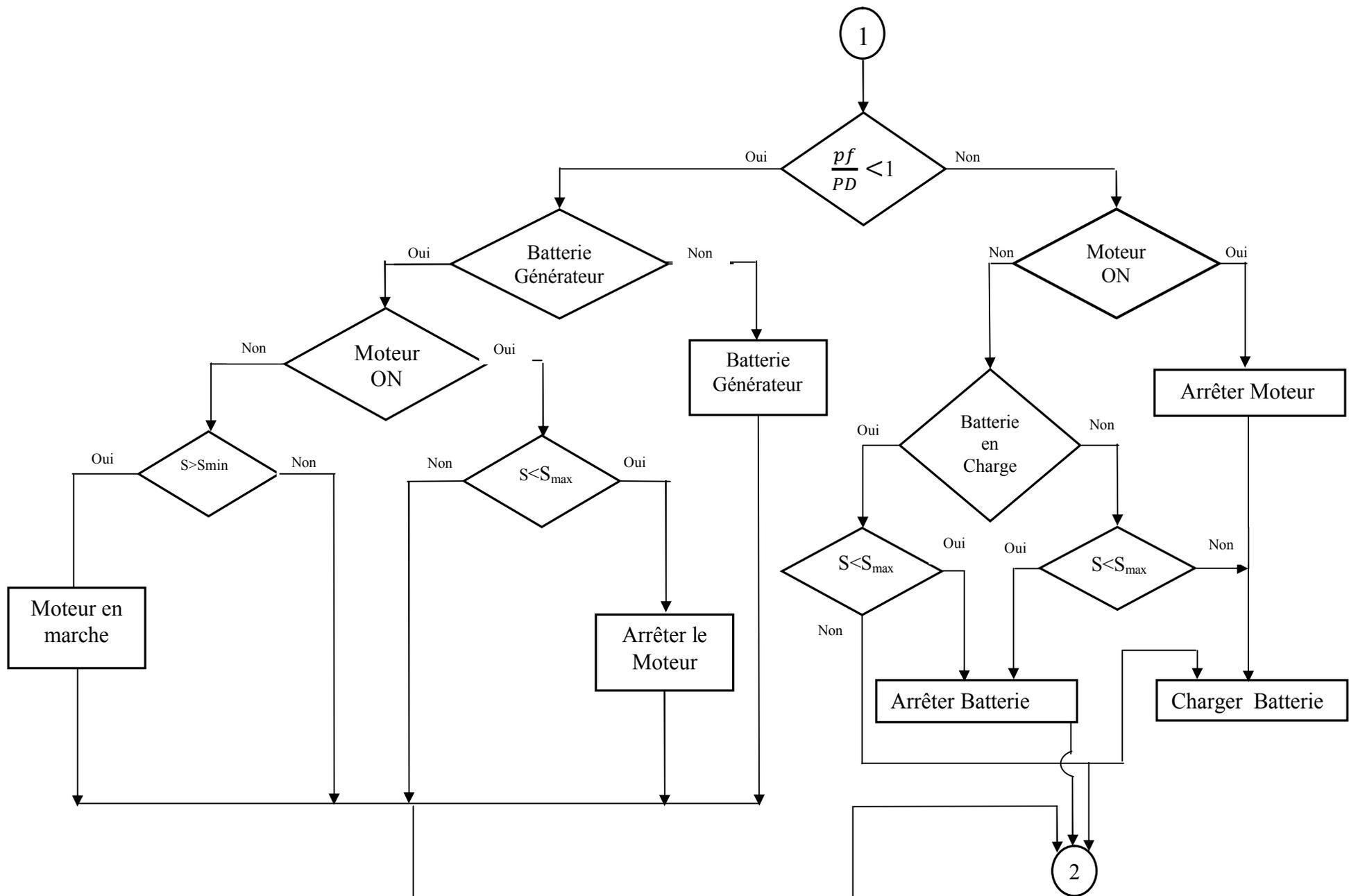
Conclusion général

Conclusion général

Le présent travail a permis de démontrer de manière simple et claire le fonctionnement d'un système hybride photovoltaïque diesel totalement autonome, et pour cela nous avons réussi à réaliser un logiciel de dimensionnement et de simulation du dit système pour différentes mesures journalières, avec le logiciel de programmation Delphi sous un environnement Windows, et pour cela on a d'abord commencer par définir les différents composants qui constituent notre système, vient ensuite la modélisation et la mise en équations de tous ces composants.

Du point de vue souple, notre logiciel est efficace et facile à utiliser car il utilise une interface qui ne demande pas une grande connaissance dans le domaine du photovoltaïque.

Comme perspectives de ce travail, on propose l'amélioration du logiciel, avec l'ajout de plusieurs sources d'énergies combinées entre elles.



NOMENCLATURE

I_{cc} : Courant de court-circuit(A).

I_{ph} : Courant photo-généré par le générateur solaire sous éclairement (A).

I_{sat} : Courant de saturation (A).

R_s : Résistance série du générateur solaire (Ω).

R_{sh} : Résistance shunt du générateur solaire (Ω).

q : Charge de l'électron ($1.6 \cdot 10^{-19}$ Coulomb).

m : Facteur d'idéalité.

K_B : Constante de Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ J/K).

K : Constante.

Φ : Flux solaire (W/m²).

T : Température absolue (°K).

V_{oc} : Tension de circuit ouvert.

P_{max} : Puissance maximale (W).

GPV : Générateur photovoltaïque.

P_m : Puissance optimale (W).

P_{in} : Puissance lumineuse incidente (W).

ff : Facteur de forme.

η : Le rendement.

EQE : Le rendement quantique.

J_{cc} : La densité de courant de court-circuit.

J : Le flux lumineux incident.

e : La charge de l'électron.

E_{ph} : L'énergie du photon.

h : La constante de Plank.

c : La vitesse de la lumière.

λ : La longueur d'onde.

$SR(\lambda)$: La réponse spectrale de la cellule.

I_{max} : Courant maximal (A).

V_{max} : Tension maximale (V).

N_s : Nombre de cellules en série.

N_p : Nombre de cellules en parallèle.

AM : Nombre d'aire-masse.

T_J : Température de jonction (°C).

S : La surface effective du générateur photovoltaïque en m².

C : La capacité de l'accumulateur (Ah).

I_D : Courant qui traverse la diode (A).

I_{PV} : courant du module PV.

V_{PV} : Tension du module PV

G_i : Irradiation solaire globale du lieu considéré (W/m²).

G_i[°] = 1000 W/m² : Irradiation solaire dans les conditions standards.

P_{max}[°] : Puissance maximale du module dans les conditions standards.

μ_{pmax} : Coefficient de variation de la puissance en fonction de la température.

T_M : Température de fonctionnement du module en fonction de l'irradiation solaire et de la température ambiante.

T_M[°] = 25°C : Température du module dans les conditions standards.

T_{amb} : Température ambiante (°C).

NOCT : La température de fonctionnement des cellules photovoltaïques dans les conditions suivantes : un ensoleillement de 800W/m², une température ambiante de 20°C et un nombre d'air-masse optique AM égale a 1.

φ : La latitude du site.

L : La longitude du site.

δ : La déclinaison du soleil.

TSV : Le temps solaire vrai.

h : La hauteur angulaire.

β : L'angle d'inclinaison du plan par rapport à l'horizontal.

w : Angle horaire.

a : L'azimut.

θ : Angle d'incidence du rayon solaire sur un plan du capteur.

G : Le rayonnement global sur un plan incliné (kWh/m²).

R_b : Le facteur d'inclinaison du rayonnement direct.

ρ : Coefficient de réflectivité du sol.

d_f : L'irradiation diffuse sur un plan incliné (kWh/m²).

d_{ri} : L'irradiation réfléchi sur un plan incline (kWh/m²).

S_h : Rayonnement direct (kWh/m²).

d_h : Rayonnement diffus (kWh/m²).

α : inclinaison.

R : résistance de la charge.

P_{OPT} : Puissance électrique optimal(W).

n : nombre de jour de l'année.

B_0 : Coefficient de la tension du module en fonction de la température (V/°C).

α_0 : Coefficient de courant du module en fonction de la température (A/°C).

ΔT : échauffement de l'accumulateur.

P_{MPPT} : Puissance de champ photovoltaïque.

N : nombre de module.

I_{bat} : Courant dans la batterie (A).

ns : nombre de cellule électrochimique.

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

E_b : Force électromotrice d'un élément électrochimique (V).

R_i : Résistance interne d'un élément électrochimique(V).

C_T : Capacité limite disponible en décharge.

C_{10} : Capacité nominal de batterie.

T_{ref} : Température de référence (25°C).

C_{bat} : Capacité total disponible en fonction du régime de décharge.

I_{10} : Courant de décharge en 10h.

EDC : état de charge de la batterie.

Q_d : Quantité de charge manquante (Ah).

t : durée de fonctionnement de la batterie.

V_{bat_d} : Tension de décharge de la batterie.

V_{bat_c} : Tension de charge de la batterie.

η_{charge} : Rendement de la batterie.

P_{bat}^* : Consigne de puissance batterie(w).

P_c : Puissance fournie a la sortie de l'onduleur.

P_s : Puissance absorbe par l'utilisation.

P_n : Puissance nominal.

P_b : Puissance fournie par la batterie.

P_g : Puissance de générateur.

η_c : Rendement de l'onduleur.

η_g : Rendement de générateur.

f : la fréquence de courant alternatifs en HZ.

K : coefficient de kapp.

N_a : Nombre de conducteur d'une phase de la machine.

Φ' : vitesse maximum à travers un enroulement (Wb).

n_s : vitesse de rotation (rpm).

K' : Constant globale (caractéristique de la machine).

e_g : f.e.m a vide(V).

V : tension aux bornes d'un enroulement de la machine(V).

R_g : resistance de l'enroulement(Ω).

L_g : inductance synchrone (H).

J_{ds} : L'inertie totale de l'ensemble du moteur diesel générateur diesel.

Ω_s : vitesse de rotation.

T_d : Couple mécanique sur l'arbre.

T_{emg} : Le couple electromagnetique.

Références :

[1] thèse mémoire 2006-2007 «Protection et mise a la terre d'une centrale solaire photovoltaïque connectée au réseau », UMMTO.

[2] SONEGAS

[3] Achour ETKA Batna university.

[4] Unité de Recherche de Batna.

[5] www.CDER.dz

[6] Ministère des énergies et des mines.

[7] Eric Schiller « le pompage photovoltaïque » manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF / universités d'Ottawa, EIER / CERR POMPAGE.

[8] Mimoun OUKACHMIH « LES CELLULES PHOTOVOLTAÏQUES A BASE DE MATERIAUX ORGANIQUES DISCOTIQUES », Année 2003.

[9] Thèse mémoire 2004-2005 (influence du choix du matériau et de la structure sur les performances des cellules solaires a conversion photovoltaïque).

[10] L. Achoui, S.Hamidi « développement d'un système photovoltaïque onduleur-MAS application au pompage photovoltaïque » PFE.ENP. juin 2004.

[12] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07.

[13] www.Wikipédia.Com.

[14] www.e-liris.com

[15] M. G. Mason, L. S. Hung, C. W. Tang, S. T. Lee, K. W. Wang, M. Wang, *J. Appl. Phys.* **6**, 1688 (1999)

[15] Song, S. K. So, D. Wang, Y. Qiu, L. Cao, *Appl. Surf. Mater.*, **177**, 158 (2001)

[16] bp solar, Décembre 2000.

[17] Th.Fogelman,R.Montloin « Installations photovoltaïques dans l'habitat isolé Edition Edisud 1983 ».

[18] A.Laugier,j.A.Roger « Les photopiles solaires, du matériau au dispositif, du dispositif aux applications .Edition technique et documentation, paris 1981 ».

[19] SANDIA « hand book of photovoltaic systems ».

[18] B.Yaici,Thèse de Magister, C.D.E.R ,Juillet 1987.

[21] Hadj .Mohammed .Idriss « modélisation du générateur photovoltaïque » Magister. ENP.2002.

[22] Julien LABBÉ L'Hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés

[23] RENEWABLE ENERGIE December 2002

[24] Olivier GERGAUD (THÈSE de DOCTORAT de l'ÉCOLE NORMALE SUPÉRIEURE de CACHAN)

[25] Photowatt : http://www.photowatt.com/products/pdf_products/PDF_PRODUCTS_118.pdf.

[26] Dumbs C, 'Développement d'outils pour l'analyse des systèmes hybrides photovoltaïquediesel', thèse de l'Ecole des Mines de Paris, CEP, Sophia-Antipolis, soutenue en décembre 1999.