

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## Mémoire de Fin d'Étude

Présenté à

**L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued**

Faculté de Technologie

Département de Génie Electrique

En vue de l'obtention du diplôme de

## **MASTER ACADEMIQUE**

En Commande Electrique

Présenté par

- Mr. Meneceur Rachid
- Mr. Baffi Hamza

# Thème

**Modélisation d'un module P V « « ECEN 2060 » »  
autonome sur Matlab et le moyen de stockage**

Soutenu le 25/05/2016. Devant le jury composé de :

Mr. Guediri abd alkerim	Maitre de conférences	Président
Mr. Lammouchi Zakaria	Maitre de conférences	Rapporteur
Mr. Zalouma Laid	Maitre de conférences	Examineur

**Année Universitaire 2015/2016**



## ***Remerciements***

*Tout d'abord je remercie Allah le Tout Puissant qui m'a donné la volonté et la patience pour élaborer ce travail.*

*Je tiens avant tout, à adresser mon très vif remerciement à Mr : **lammouchi zakaria** qui a accepté de m'encadrer et qui n'a jamais ménagé son temps et ses efforts pour m'avoir prodigué ses conseils.*

*Je exprimer aussi ma vive reconnaissance au personnel de la **Groupe Génie Electrique**, pour leurs patiences et leurs aides*

*Je tenter à remercier également les enseignants de l'Université de : **L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued***

*Département de Génie Electrique*



# Dédicaces

*A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, de fierté, de  
sagesse et de patience.  
A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à  
qui je dois de l'amour et la reconnaissance.*

✚ *Mes chers Parents.*

✚ *Ma chère Grande Mère.*

✚ *Mes Frères surtout \*redha et tayeb\*.*

✚ *Mes Sœur .*

✚ *MA fiancée safi*

✚ *Ma Famille et tous mes Proches.*

✚ *A mon cher ami et co-binome : hamza*

✚ *Et à tous qui me connaît et compte sur moi...*

*Rachid.*



# Dédicaces

*A ceux qui m'ont donné la vie, symbole de beauté, de fierté, de  
sagesse et de patience.*

*A ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à  
qui je dois de l'amour et la reconnaissance.*

✚ *Mes chers Parents.*

✚ *Ma chère Grande Mère.*

✚ *Mes Frères.*

✚ *Mes Sœur.*

✚ *Ma fiancée bouthaina*

✚ *Ma Famille et tous mes Proches.*

✚ *A mon cher ami et Co-binôme : **Rachid.***

✚ *Et à tous qui me connaît et compte sur moi...*

✚ *hamza*





## Table des matières :

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

### CHAPITRE I : l'énergie photovoltaïque: production

I-1. Introduction.....	4
I-2. Production de l'énergie électrique photovoltaïque.....	4
I-2-1. Le rayonnement solaire.....	4
I-2-2. Le générateur photovoltaïque.....	7
I-2-2-1. Principe photovoltaïque.....	7
a- Jonction PN.....	7
b- Production d'électricité.....	8
c- Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	9
I-2-2-2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque.....	9
a- Générateur photovoltaïque idéal.....	9
b- Générateur photovoltaïque "réel".....	11
c- Caractéristiques de la cellule photovoltaïque.....	12
d-Point de puissance maximale, rendement, facteur de forme.....	13
I-2-2-3. Facteurs influençant le fonctionnement d'une cellule Photovoltaïque.....	15
- Influence de l'ensoleillement ou irradiation.....	15
- Influence de la température.....	16
I-2-2-4. Caractéristique d'un module photovoltaïque.....	16
I-3. Conclusions.....	20



## Chapitre II : Modélisation du système photovoltaïque

III-1. Introduction .....	21
III-2. Synthèse des architectures de systèmes photovoltaïques autonomes.....	21
III-2-1. Alimentation directe sans transformation.....	22
III-2-2. Alimentation directe avec transformation .....	22
III-2-3. Système autonome avec stockage.....	23
III-3. Dimensionnement énergétique du système photovoltaïque .....	24
III-3-1. Profil de consommation .....	24
III-3-2. L'ensoleillement .....	24
III-3-3. Dimensionnement du système PV.....	25
III-4. Modélisation des composants du système.....	27
III-4-1. Le générateur photovoltaïque .....	27
III-4-2.les convertisseurs d'énergie.....	34
III-5. Simulation du système photovoltaïque : évaluation des performances du système.....	39
III-6. Conclusions.....	44

## CHAPITRE III : Stockage de l'énergie électrique photovoltaïque

III-1. Introduction.....	45
III-2. Synthèse des différents dispositifs de stockage.....	45
III-2-1. Caractéristique d'un module photovoltaïque.....	45
III-2-2. Moyens de stockage, comparaison.....	47
III-3. Stockage de l'énergie électrique photovoltaïque .....	51
III-3-1. Principe du stockage hybride dans les systèmes électriques.....	51
III-3-2. Batteries au plomb : fonctionnement et performances.....	52
III-3-2-1. Fonctionnement d'un accumulateur au plomb.....	52
III-3-2-2. Les différents types de batteries au plomb.....	55
III-3-2-3. Performances techniques.....	56
III-3-2-4. Contexte industriel et économique.....	57
III-4. Stockage électrique : les super capacités.....	57
III-4-1. Principe.....	57
III-4-2. Performances.....	58
III -4-3. Applications.....	60
III-5. Conclusions.....	61
Conclusion générale.....	62
Bibliographie	





## Listes des Tableaux et des figures

<b>Fig.1.1.</b> spectre solaire .....	6
<b>Fig.1.2.</b> Principe de la conversion photon-électron dans un système a deux niveaux d'énergie.....	8
<b>Fig.1.3.</b> Production d'électricité par la séparation électron-trou.....	9
<b>Fig.1.4.</b> Modèle simplifié d'une cellule PV.....	10
<b>Fig. 1.5.</b> Modèle de la cellule PV avec prise en compte de perte en tension et Courant de fuite On a .....	11
<b>Fig. 1.6.</b> Caractéristique I-V d'une cellule PV, ensoleillement $E=430W/m^2$ Température $T=300K$ .....	12
<b>Fig. 1.7.</b> : Mise en évidence du courant inverse dans une cellule PV.....	13
<b>Fig. 1.8.</b> Mise en évidence du MPP.....	13
<b>Fig. 1.9.</b> Caractéristique idéale d'une cellule P-V.....	14
<b>Fig. 1.10.</b> Influence de l'ensoleillement .....	15
<b>Fig. 1.11.</b> Influence de la température sur un module.....	16
<b>Fig. 1.12.</b> Association en série de cellules identiques.....	17
<b>Fig. 1.13.</b> Effet d'un éclairage non uniforme sur un module $E=407W/m^2$ $T=300K$ .....	18
<b>Fig. 1.14.</b> Modules protégés connectés en série : caractéristique résultante (cF=cellule forte, cf=cellule faible).....	19
<b>Fig. 1.15.</b> Caractéristiques résultantes d'un générateur associant np cellules en parallèle et ns cellules en série (identiques ou éventuellement disparates).....	19
<b>Fig. 2.1.</b> Schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque.....	21
<b>Fig. 2.2.</b> Présentation générale d'un système photovoltaïque.....	22
<b>Fig. 2.3.</b> Profil de consommation sans pics de puissance (Profil 1).....	23
<b>Fig. 2.4.</b> Profil de consommation avec pics de puissance de 2,3kW (Profil 2).....	23
<b>Fig. 2.5.</b> Irradiation au mois de juin a La Rochelle.....	24
<b>Fig. 2.6.</b> Irradiation au mois de décembre a La Rochelle.....	25

<b>Fig. 2.7.</b> Modèle de la cellule PV .....	27
<b>Fig. 2.8.</b> Les Etapes de modélisation d'un système PV sous Matlab (ECEN2060).....	29
<b>Fig. 2.9.</b> Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique : <b>(a)</b> -P-V et <b>(b)</b> -I-V d'une cellule.....	30
<b>Fig. 2.10.</b> Modèle Simulink d'un module PV de 1000W/m <sup>2</sup> .....	32
<b>Fig. 2.11.</b> Caractéristiques I-V et P-V du module PV.....	33
<b>Fig. 2.12.</b> Configuration de la Source PV du Système Les diodes d'anti-retour Ne sont pas représentées sur cette figure.....	34
<b>Fig. 2.13.</b> Hacheur boost avec sa commande.....	35
<b>Fig. 2.14.</b> Un hacheur boost dédiée à la conversion de l'énergie provenant des panneaux P.....	37
<b>Fig. 2.15.</b> un convertisseur permettant d'adapter la tension du bus DC AC a celle de l'utilisateur.....	38
<b>Fig. 2.16.</b> Synoptique du système PV avec stockage d'énergie.....	39
<b>Fig. 2.17.</b> Simulation model: PV boost DC/DC charge continue.....	40
<b>Fig. 2.18.</b> Les résultats de simulation pour une charge continue .....	41
<b>Fig. 2.19.</b> Simulation model: PV boost DC/AC charge alternative.....	43
<b>Fig. 3.1.</b> Représentation interne de l'accumulateur.....	52
<b>Fig. 3.2.</b> Evolution de la tension d'une cellule de batterie au plomb.....	53
<b>Fig. 3.3.</b> Les différents types de batteries.....	54
<b>Fig. 3.4.</b> Condensateur électrolytique (a) et super capacité (b).....	56
<b>Fig. 3.5.</b> Principe de développement des super capacités.....	57
<b>Tab 2.1.</b> Récapitulatif des paramètres du système.....	36
<b>Tab. 3.1.</b> Comparaison de différentes technologies de stockage.....	49
<b>Tab. 3.2.</b> Principales données techniques de la batterie au plomb.....	55
<b>Tab. 3.3.</b> Caractéristiques des principaux composants carbonés a électrolyte organique.....	58
<b>Tab. 3.4.</b> Caractéristiques des principaux composants carbonés a électrolyte aqueux.....	59
<b>Tab. 3.5.</b> Tableau comparatif.....	61
<b>Fig. 3.6.</b> Schéma comparatif.....	60



## INTRODUCTION GENERALE :

Avec l'arrivée du nouveau millénaire, les débats sur l'avenir énergétique de la planète se sont intensifiés compte tenu des besoins sans cesse croissants dans le domaine et les conséquences que cela peut engendrer à moyen terme. En effet, l'évolution démographique et le développement de certaines zones géographiques, l'Asie aujourd'hui, l'Amérique Latine et la Russie demain, laissent présager une augmentation considérable de la consommation en énergie. A ce rythme, les réserves en énergies fossiles ne pourront assurer les besoins que pour quelques décennies encore, entraînant des situations de pénurie dont les prémices se sont faites ressentir à travers la crise du pétrole de ces deux dernières années. Les gisements de ressources énergétiques d'origines fissiles, même si elles offrent une alternative à court/moyen terme, posent quant à elles de réels problèmes environnementaux liés au traitement des déchets radioactifs et au démantèlement des centrales nucléaires obsolètes.

Une première piste à cette crise annoncée étant la diminution de la consommation énergétique, c'est ainsi que sont apparus sur le marché, ces dernières années, des appareils de faible consommation de classe A ou A+ (réfrigérateurs, laves linge, ampoules basse consommation, ...). En parallèle, il faut développer de nouvelles sources d'énergie propres et renouvelables. A ce sujet, le soleil, le vent, la biomasse, la mer, ... apparaissent comme des énergies inépuisables et facilement exploitables. Ainsi, d'après l'Agence Internationale de l'Energie (AIE), si l'on prend l'exemple du soleil, une surface de 145000km<sup>2</sup> (4% de la surface des déserts arides) de panneaux photovoltaïques (PV) suffirait à couvrir la totalité des besoins énergétiques mondiaux.

Au-delà de toutes considérations hypothétiques, il apparaît que le photovoltaïque se présente comme une solution d'avenir car il offre une multitude d'avantages :

- la production de cette électricité renouvelable n'émet pas de gaz à effet de serre, il faut cependant réduire l'impact environnemental de la fabrication du système,
- la lumière du soleil étant disponible partout et quasi-inépuisable, l'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne, dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville, et aussi bien au Sud que dans le Nord,

- l'électricité photovoltaïque peut être produite au plus près de son lieu de consommation, de manière décentralisée, directement chez l'utilisateur, ce qui la rend accessible à une grande partie de la population mondiale.

Le caractère écologique du photovoltaïque peut aussi être mis en avant par rapport à d'autres moyens de production : contrairement à ce que l'on peut croire, une installation rembourse l'énergie nécessaire à sa fabrication dans un délai de 1 à 3 ans suivant l'ensoleillement du site (source Agence Internationale de l'Énergie) et de surcroît, permet d'économiser entre 1,4 et 3 tonnes de CO<sub>2</sub> au cours de sa durée de vie pour 1 kWc installé.

Dans un contexte de crise énergétique mondiale et de réchauffement climatique, il est des lors aisé de comprendre l'engouement des gouvernements à encourager l'installation de systèmes photovoltaïques. Ainsi, la marche mondiale se verra multiplier par cinq d'ici les dix prochaines années. Même si la marche photovoltaïque française tarde à décoller réellement, selon les prévisions, l'électricité d'origine photovoltaïque sera compétitive par rapport aux autres sources de production vers 2020.

Les performances à grande échelle citées plus haut sont très attractives, mais avant de les atteindre, il faudra s'affranchir de certaines contraintes en optimisant le fonctionnement global d'un système photovoltaïque. Ainsi, en revenant à une plus petite échelle et en considérant un site de production décentralisée autonome, il faudra notamment s'affranchir du caractère intermittent de la fourniture d'énergie tout en permettant aux panneaux photovoltaïques de fonctionner dans des conditions optimales.

C'est dans cette problématique que se situe ce projet : concevoir et optimiser un système photovoltaïque énergétiquement autonome. En effet, la surproduction d'énergies photovoltaïques est revendue actuellement à un réseau d'énergie, alternative qui risque fort dans un avenir proche de se révéler moins rentable qu'actuellement (diminution ou suppression des tarifs de rachat).

Pour parvenir à cet objectif, il faudra s'affranchir des deux principaux problèmes liés à la production d'énergie photovoltaïque en site isolé qui sont la difficulté de fonctionnement suivant un point optimal et le stockage efficace de l'énergie produite. En effet, du fait du caractère non linéaire de la caractéristique des panneaux photovoltaïques, leur tension dépend fortement de la charge connectée. Pour corriger ce problème, des dispositifs MPPT (Maximum Power Point Tracking) permettent aux panneaux de fonctionner dans des conditions optimales et ainsi d'extraire le maximum de puissance. S'agissant du problème lié au stockage, l'utilisation des batteries au plomb est très répandue dans le domaine et permet

d'atteindre un rapport performance/cout assez intéressant. Malheureusement lorsque ces dernières sont soumises a des conditions d'utilisation extrêmes (fort courant de décharge par exemple), leur performance se dégrade rapidement. Des lors, l'utilisation d'une source hybride de stockage s'avère judicieuse ; les batteries seront dédiées a leur rôle traditionnel de stockage et de fourniture d'énergie tandis que la source associée permettrait de faire face aux forts appels de courant.



# **CHAPITRE I:**

## **L'ENERGIE PHOTOVOLTAIQUE: PRODUCTION**

**I-1. Introduction :**

Au rythme de la consommation actuelle des ressources énergétiques les gisements d'énergies fossiles (charbon, pétrole et gaz) et fissiles (uranium), même selon les scénarios les plus extrêmes, ne représentent plus que quelques dizaines d'années ou au mieux un peu plus d'un siècle pour le cas du charbon. La situation est d'autant plus alarmante que la demande énergétique va en grandissant. Le photovoltaïque, ayant comme source le soleil (énergie quasi inépuisable à l'échelle humaine), se positionne comme une solution à l'épuisement des ressources d'énergies fossiles. Malheureusement, bien que la production d'énergie renouvelable soit en forte expansion ces dernières années, plus de 80% de la production d'énergie provient encore des énergies fossiles et fissiles. En effet, au-delà du caractère « propre » des énergies renouvelables, ces dernières présentent l'avantage de pouvoir être produites par de petits systèmes isolés appelés système de production décentralisée.

**I-2. Production de l'énergie électrique photovoltaïque :****I-2-1. Le rayonnement solaire :**

Le rayonnement émis par le soleil comporte des ondes électromagnétiques dont une partie, appelée le rayonnement solaire, ne cesse de parvenir à la limite supérieure de l'atmosphère terrestre. En raison de la valeur prise par la température superficielle du soleil environ  $5800^{\circ}\text{K}$ , l'énergie de rayonnement électromagnétique transmise à la terre provient essentiellement de l'émission d'ondes lumineuses qui se situent dans le visible (entre 0,4 et 0,7  $\mu\text{m}$  de longueur d'onde environ) et le proche infrarouge (entre 0,7 et 4  $\mu\text{m}$  environ) ; cette énergie, moyennée sur une année et sur l'ensemble de la limite supérieure de l'atmosphère, correspond à un éclairage de quelque  $340 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . Mais sur cette quantité d'éclairage qu'apporte le soleil au système terre-atmosphère, environ  $100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  sont réfléchis vers l'espace : le reste est absorbé, pour un tiers par l'atmosphère et pour les deux tiers par la surface terrestre.

Tout d'abord, près du quart de cet éclairage incident est réfléchi dans l'espace par l'atmosphère : pareille réflexion est essentiellement le fait des nuages (environ  $65 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ ), le reste étant dû aux autres constituants atmosphériques -gaz et aérosols- qui réfléchissent environ  $15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ . En outre, l'atmosphère et ses nuages prélèvent par absorption  $80 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  environ sur l'éclairage solaire : restent donc approximativement  $180 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  qui parviennent à la surface terrestre au terme d'une transmission dont à peu près les deux tiers se font directement, le reste s'effectuant par diffusion vers le bas ; c'est grâce à ce

rayonnement diffus que l'on peut voir sans interruption pendant le jour, même quand les nuages cachent le soleil . [7]

On assiste a un processus assez complexe d'interaction entre diffusion vers le bas et réflexion : la surface terrestre, possédant un albédo moyen élève (l'albédo est la fraction d'un rayonnement incident diffusée ou réfléchi par un obstacle), devrait renvoyer dans l'atmosphère environ  $50 \text{ W.m}^{-2}$  sur les quelque  $180 \text{ W.m}^{-2}$  incidents ; mais en fait, la majeure partie de l'éclairement qu'elle réfléchit ainsi lui revient tôt ou tard par diffusion vers le bas depuis le milieu atmosphérique et s'ajoute partiellement aux  $130 \text{ W.m}^{-2}$  de rayonnement solaire non réfléchis a son contact. Bien qu'il n'existe pas dans la réalité deux instants distincts pour l'absorption par la surface terrestre, mais un phénomène continu d'absorption du rayonnement solaire, on peut résumer le processus précédent en disant que tout se passe comme si les  $50 \text{ W.m}^{-2}$  réfléchis par cette surface se répartissaient entre  $20 \text{ W.m}^{-2}$  définitivement renvoyés vers l'espace interplanétaire après diffusion vers le haut a travers l'atmosphère et  $30 \text{ W.m}^{-2}$  retournant a la surface terrestre après diffusion différée vers le bas. Ces  $30 \text{ W.m}^{-2}$  s'ajoutent aux  $130 \text{ W.m}^{-2}$  initialement non réfléchis pour constituer approximativement les  $160 \text{ W.m}^{-2}$  — pratiquement la moitié du rayonnement solaire — qu'absorbe la surface terrestre.

En ramenant toutes les couches de l'atmosphère dans des conditions normales ( $P= 1013 \text{ mbar}$  et  $t= 25^\circ\text{C}$ ), on a défini une atmosphère standard d'épaisseur verticale moyenne de  $7,8 \text{ km}$  prise pour référence unité et formée de couches planes et stratifiées composées par les divers gaz comme l'azote (couche de  $6150 \text{ m}$ ), l'oxygène ( $1650 \text{ m}$ ), l'argon ( $74 \text{ m}$ ), le gaz carbonique ( $24 \text{ m}$ )... L'eau est représentée par une couche d'épaisseur variable de quelques dizaines de mètres pour la vapeur et de quelques centimètres pour le liquide.

De la on introduit le nombre d'air masse  $m$  qui permet de tenir compte de l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons solaires suivant l'inclinaison du soleil.

$$m = \frac{p}{1013} \cdot \frac{1}{\sin A} \cdot e^{\left(\frac{z}{7.8}\right)} \dots\dots\dots(1.1)$$

Avec :  $p$  ( $\text{N.m}^2$ ) pression

$A$  ( $^\circ$ ) élévation du soleil sur l'horizon ( $90^\circ$  au zénith)

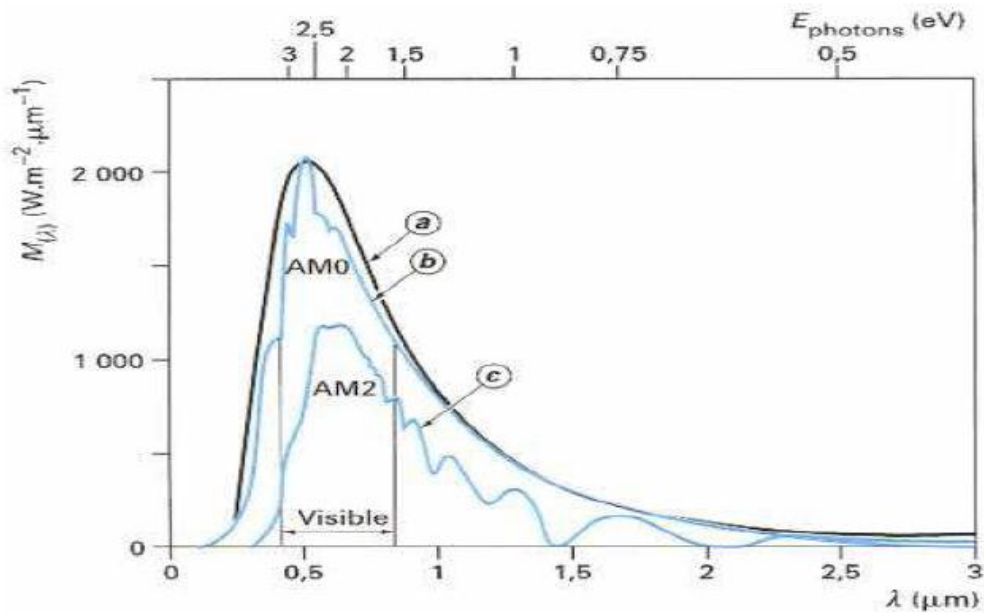
$Z$  ( $\text{km}$ ) altitude

Ainsi, au niveau de la mer ( $z=7800\text{m}$ ),

$$m \approx \frac{1}{\sin A} \dots\dots\dots(1.2)$$

Et on dit qu'on a les conditions AM1 lorsque le soleil est au zénith, AM2 lorsqu'on a une inclinaison de 30°.

Hors atmosphère a haute altitude, on est dans les conditions AM0.



- a- théorique du corps noir à 5800k
- b- hors atmosphère
- c- au sol soleil a 30° par rapport à l'horizon

**Fig. 1.1.** Spectre solaire.

Il est important de comprendre les deux aspects recouverts par le concept de nombre d'air masse. D'une part, il caractérise la puissance transportée par le rayonnement solaire ( $1353 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  pour AM0,  $833 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  pour AM1,5) et d'autre part, il sert à définir un spectre de référence pour calibrer les cellules étalons destinées à qualifier les performances des dispositifs photovoltaïques. Ainsi les conditions standards de qualification des cellules sont un spectre AM1,5, une puissance incidente de  $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ . Sauf indication contraire, c'est pour de telles conditions que doivent être fournies les performances et spécifications d'un dispositif photovoltaïque donné. [8]

**I-2-2. Le générateur photovoltaïque :**

La cellule photovoltaïque ou encore photopile est l'élément constitutif des modules photovoltaïques. Un panneau photovoltaïque est constitué de plusieurs modules, ces derniers étant constitués de plusieurs cellules en série afin d'obtenir une tension souhaitée. Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque consiste en une conversion d'énergie lumineuse (solaire) en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque, une des propriétés électriques des semi-conducteurs. [31]

**I-2-2-1. Principe photovoltaïque :**

**a- Jonction PN :**

Une jonction P-N est créée par la mise en contact d'un semi-conducteur dope N (donneurs d'électron) et d'un semi-conducteur dope P (compose de trous). L'interface entre ces deux régions s'appelle une jonction.

Pour réaliser des cellules photovoltaïques, il existe trois configurations de jonctions :

- \_ Une jonction PN (homo-jonction, i.e. : les deux régions sont constituées d'un même matériau semi-conducteur, du silicium dans la majorité des cas)
- \_ Une hétérojonction (jonction entre deux semi-conducteurs différents)
- \_ Une jonction métal-semi-conducteur.

Dans ces trois configurations, les phénomènes physiques intervenant dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques sont similaires.

Les électrons de la jonction se déplacent vers la région P et les trous vers la région N. Il ne reste que des atomes ionisés fixes. Cette zone (dite de déplétion) de porteurs libres est appelée « zone de charge d'espace » créant un champ électrique. En dehors, le champ électrique est nul. Dans une homo-jonction à l'équilibre thermodynamique, à la frontière des deux régions, il s'est formé pendant le processus de déplétion, une barrière de potentiel ( $V_D$ ) (tension de diffusion).

$$V_D = \frac{kT}{q} \ln \left( \frac{N_D N_A}{n_j^2} \right) \dots\dots\dots (1.3)$$

$V_D$  (V) tension de diffusion sur une jonction

$K=1,380662 \cdot 10^{-23} \text{ j.k}^{-1}$  constante de Boltzmann

$T$ (k) température absolue du cristal

$q=1,602.10^{-19}$  c charge élémentaire

$N_D(\text{cm}^{-3})$  concentration des donneurs

$N_A(\text{cm}^{-3})$  concentration des accepteurs

$n_i(\text{cm}^{-3})$  concentration intrinsèque

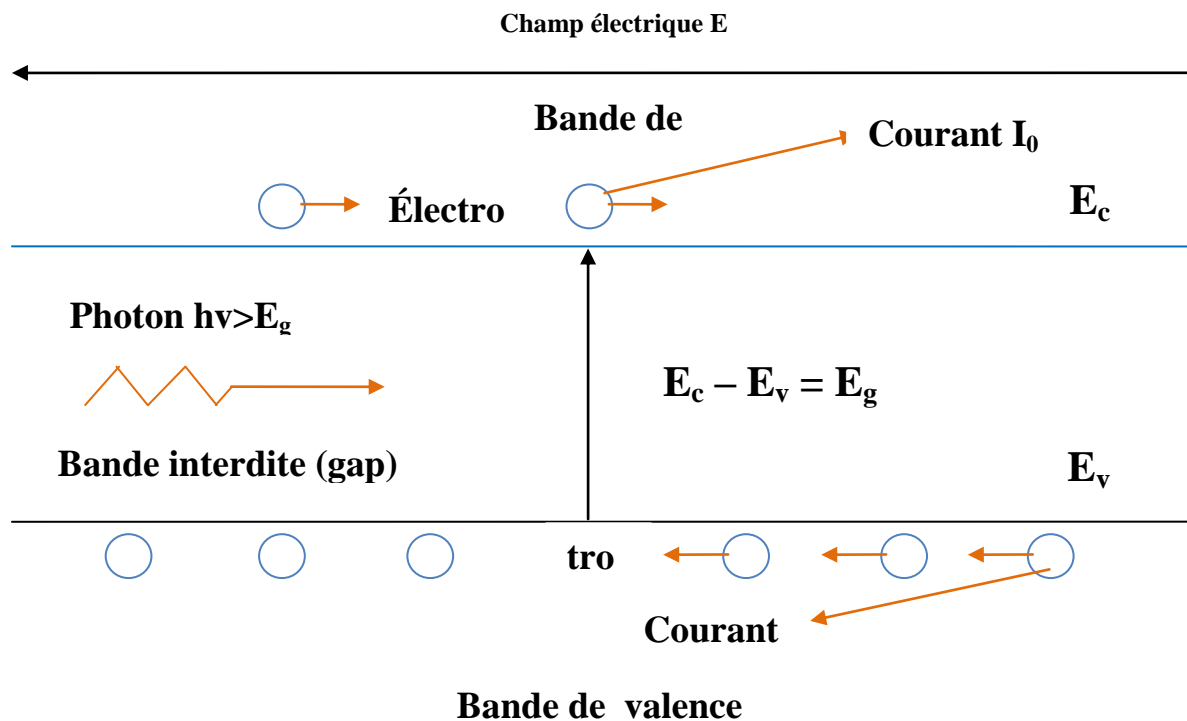
Avec  $V_T = kT/q = 26$  mV à la température ambiante.

Les cellules solaires photovoltaïques sont souvent des jonctions dissymétriques, c'est-à-dire qu'un dopage est plus fort que l'autre. Dans ce cas, la zone de charge d'espace se trouve pratiquement dans la région la plus faiblement dopée.

**b- Production d'électricité :**

La cellule solaire est le lieu où la conversion d'énergie lumineuse en énergie électrique se produit. La puissance électrique résultant de cette conversion dépend du flux et de la répartition spectrale de l'énergie spectrale.

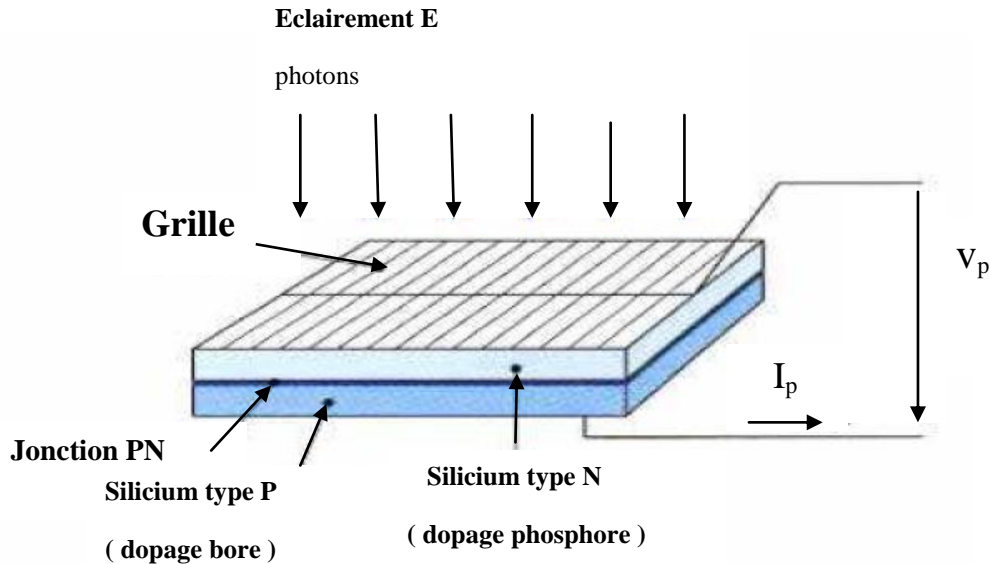
Dans une cellule photovoltaïque basée sur une jonction PN une excitation lumineuse crée, aux alentours de la jonction, des paires électron-trou qui se déplacent sous l'influence du champ électrique de la jonction.



**Fig. 1.2.** Principe de la conversion photon-électron dans un système à deux niveaux d'énergie. [12]

### c- Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

La naissance d'une différence de potentiel lorsque les porteurs de charges sont créés dans les environs de la jonction par excitation lumineuse, permet à la cellule de fonctionner comme un générateur électrique quand les deux faces de la cellule sont électriquement reliées à une charge, par exemple une résistance R.



**Fig. 1.3.** Production d'électricité par la séparation électron-trou.

Les contacts de la face éclairée de la cellule ont la structure d'une grille afin de n'occulter qu'une faible partie de la surface (5 à 10%). La face arrière peut être entièrement métallisée.

Afin de réduire les pertes par réflexion du rayonnement incident, une couche antireflet recouvre uniformément toute la face avant.

La puissance maximale pouvant être délivrée par le module photovoltaïque est définie sur sa caractéristique I-V par le point de puissance maximale (MPP en anglais, Maximum Power Point). Une transformation de la caractéristique de la charge connectée permet donc de bénéficier du maximum de puissance du module.

#### I-2-2-2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

##### a. Générateur photovoltaïque idéal :

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule

PV. Si l'on connecte une charge résistive aux bornes du générateur photovoltaïque, ce dernier y débite une part de courant  $I$  et le reste, le courant  $I_D$ , dans la diode. On a alors la relation :

$$I = I_{ph} - I_D \dots \dots \dots (1.4)$$

Pour un générateur PV idéal, la tension aux bornes de la résistance est égale à celle aux bornes de la diode :

$$V = V_D \dots \dots \dots (1.5)$$

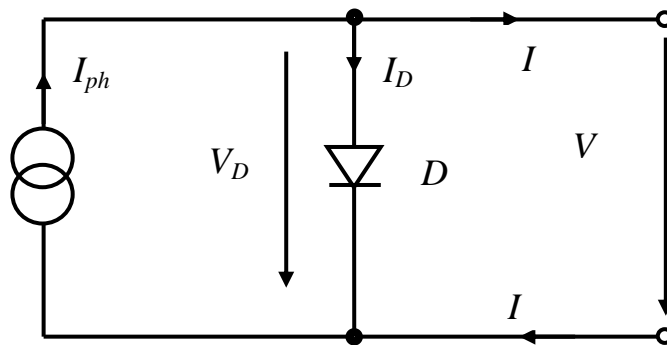


Fig. 1.4. Modèle simplifié d'une cellule PV.

La diode étant un élément non linéaire, sa caractéristique I-V est donnée par la relation

$$I_D = I_s \left( e^{\left( \frac{V_D}{V_T} \right)} - 1 \right) \dots \dots \dots (1.6)$$

Avec

$I_s$  courant de saturation inverse de la diode

$V_T = kT/q$ , potentiel thermique

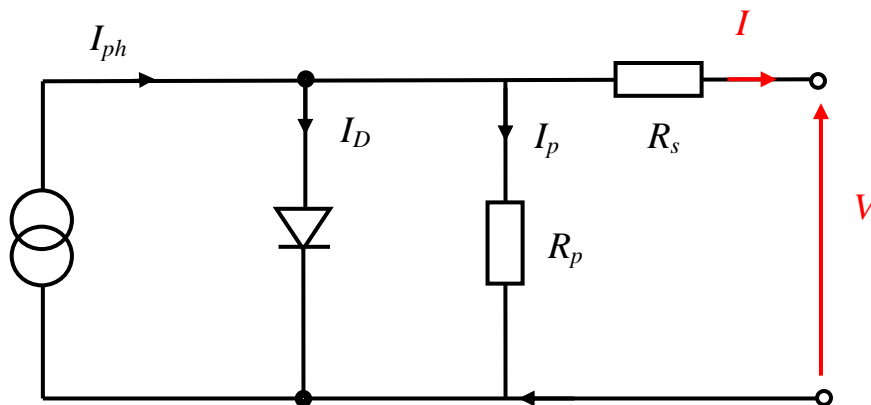
Le courant débite équivaut a :

$$I = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_s \left( e^{\left( \frac{V_D}{V_T} \right)} - 1 \right) \dots \dots \dots (1.7)$$

Ce modèle reste théorique et ne rend pas compte du comportement d'une cellule photovoltaïque dans des conditions réelles. Toutefois, il reste valable sous certaines hypothèses (non prise en compte de perte de tension, courant de fuite...). Il existe d'autres modèles, certes théoriques, mais qui rendent plus fidèlement compte du comportement de la cellule photovoltaïque.

**b. Générateur photovoltaïque "réel" :**

Le modèle photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série  $R_s$  et les courants de fuite par une résistance en parallèle  $R_p$ .



**Fig. 1.5.**Modèle de la cellule PV avec prise en compte de perte en tension et courant de fuite.

On a :

$$I = I_{ph} - I_D - I_p \dots \dots \dots (1.8)$$

$$I_p = \frac{V_D}{R_p} = \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} \dots \dots \dots (1.9)$$

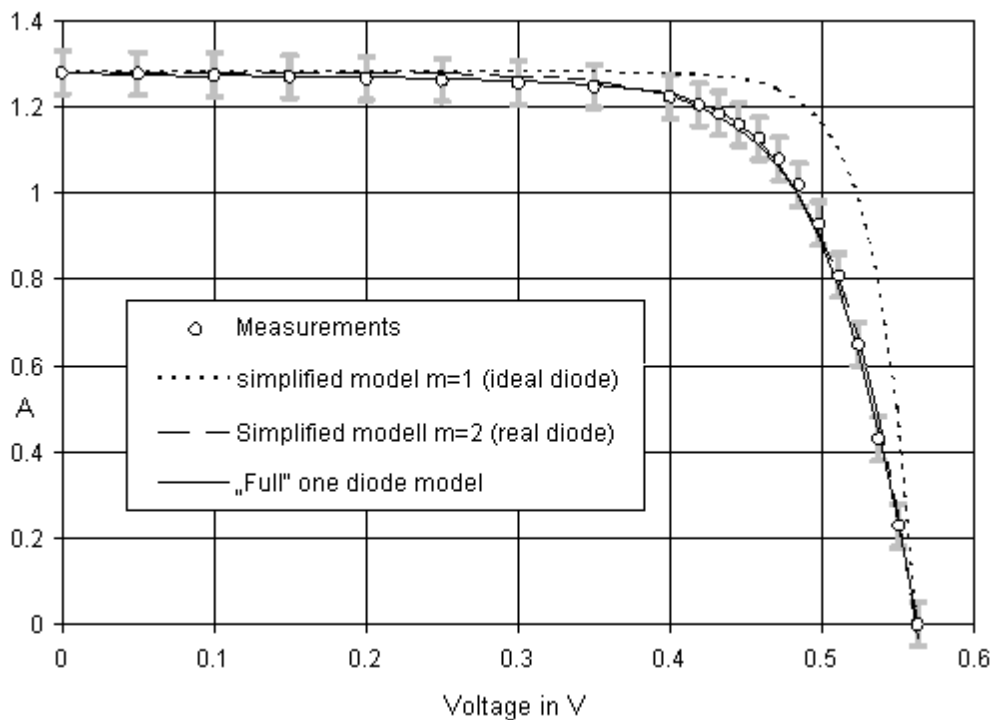
$$0 = I_{ph} - I_s \cdot \left( e^{\left( \frac{V + I \cdot R_s}{m \cdot V_T} \right)} - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_p} - 1 \dots \dots \dots (1.10)$$

Nous obtenons une équation implicite en I et U qui peut être résolue grâce à une méthode numérique (la méthode de Newton-Rafeson par exemple).

### c. Caractéristiques de la cellule photovoltaïque :

La comparaison entre la caractéristique I-V des modèles ci-dessus et celle d'une cellule poly cristalline réelle est représentée en **Fig.1.7**. Nous pouvons remarquer que, dans la zone de fonctionnement de la cellule, la caractéristique I-V du modèle simplifié (**Fig.1.5**) présente des écarts non négligeables par rapport a celle d'une cellule PV réelle ; avec un même modèle a diode réelle ( $m>1$ ), on se rapproche de la caractéristique de la cellule réelle.

Enfin, on obtient une caractéristique encore plus précise grâce au modèle complet de la cellule réelle (**Fig. 1.6**).



**Fig. 1.6.** Caractéristique I-V d'une cellule PV, ensoleillement  $E=430\text{W/m}^2$ , température  $T=300\text{K}$ .

Le courant inverse dans la cellule ou courant d'obscurité est mis en évidence sur la figure suivante 1.8. Pour cela, on applique une tension aux bornes de la cellule. Pour une tension positive, la diode est dans un état passant ; pour une tension négative, elle reste bloquée jusqu'à  $-15\text{V}$ , puis passe lentement à l'état passant. On observe à ce niveau une dissipation d'énergie sous forme de chaleur pouvant causer des dommages irréversibles sur la cellule.

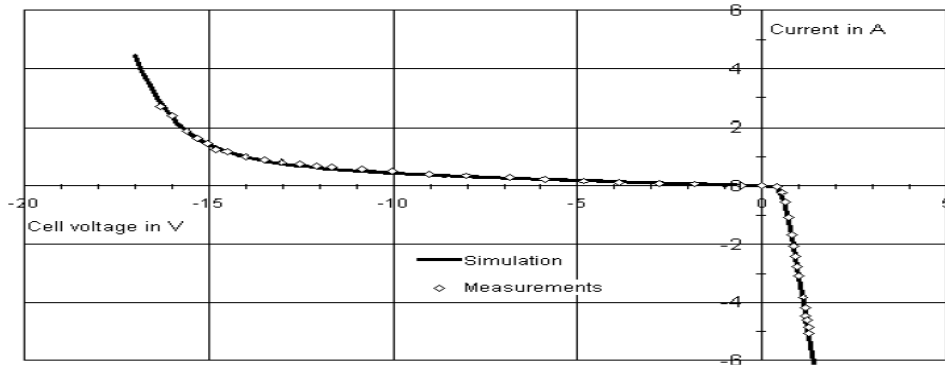


Fig. 1.7. : Mise en évidence du courant inverse dans une cellule PV.

Dans un système PV, ce courant inverse peut s'établir s'il arrivait que les sources de stockage se déchargent dans les modules durant la nuit. Il est donc nécessaire de protéger ces derniers en intégrant au système une diode de blocage.

**d. Point de puissance maximale, rendement, facteur de forme :**

**Point de puissance maximale :** Pour une cellule PV, nous pouvons définir le courant de court circuit  $I_{SC}$  et la tension a vide  $V_{OC}$ . Le courant  $I_{SC}$  correspond a la valeur du courant débite lorsque la cellule est court-circuitée alors que  $V_{OC}$  est la tension a ses bornes en l'absence de charge Si nous traçons la courbe de puissance  $P$  (avec  $I \times V \in [0, I_{SC}] \times [0, V_{OC}]$ ), nous obtenons un point de fonctionnement  $P_{MPP}$  ou la puissance est maximè¹-

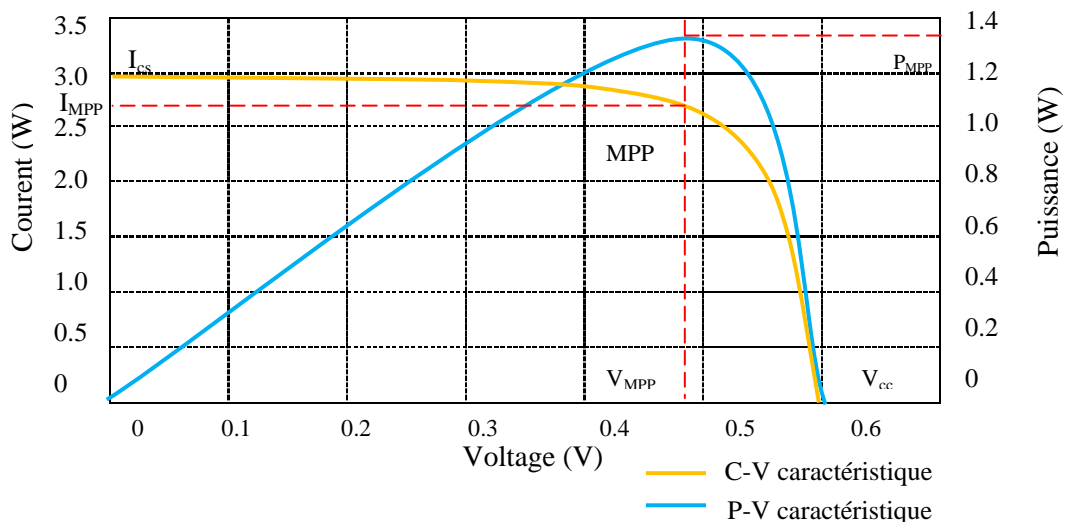


Fig. 1.8. Mise en évidence du MPP.

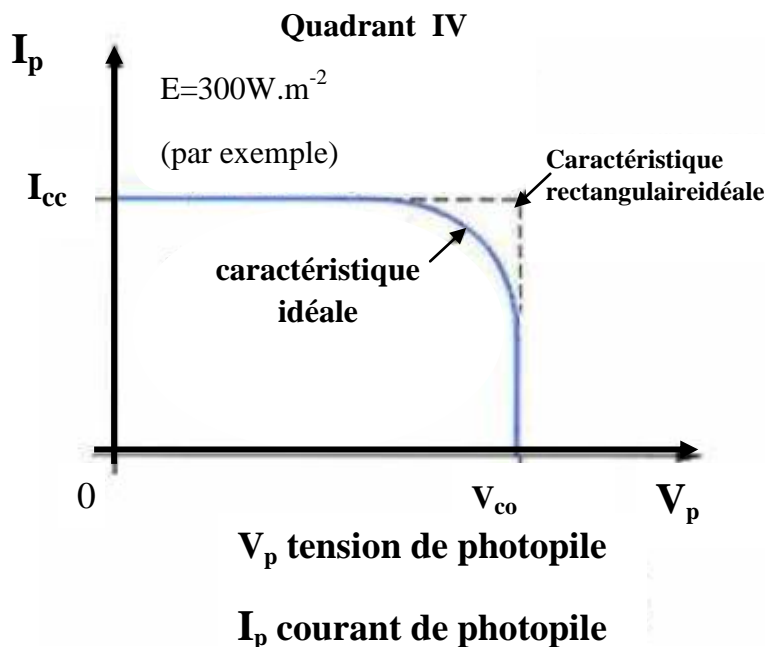
- Rendement :** Nous pouvons définir le rendement d'une cellule photovoltaïque comme le quotient de la puissance maximale et de la puissance lumineuse reçue par la cellule. Cette puissance lumineuse correspond au produit de l'aire de la cellule par l'ensoleillement.

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{A_c \cdot E} \dots\dots\dots(1.11)$$

- Facteur de forme :** Il permet de juger de la qualité d'une cellule photovoltaïque. Il est défini comme le rapport entre le point de puissance maximum et la puissance à courant de court-circuit et tension en circuit ouvert.

$$FF = \frac{P_{MPP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} = \frac{\eta \cdot A_c \cdot E}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \dots\dots\dots(1.12)$$

A partir de cette définition, pour une cellule dont la caractéristique I-V est rectangulaire (source de courant), le facteur de forme sera donc unitaire. Le facteur de forme d'une bonne cellule photovoltaïque devra être compris entre 0,75 et 0,85.



**Fig. 1.9.** Caractéristique idéale d'une cellule P-V. [10]

C'est dans ce quatrième quadrant, où la jonction PN fonctionne en générateur, que la tension à vide est celle de la diode en polarisation directe (0,5 à 0,8 V pour Si). La caractéristique dans le quatrième quadrant de la jonction est donc celle de la cellule photovoltaïque. L'intersection de cette caractéristique avec celle de la charge donne le point de fonctionnement de la cellule.

La caractérisation de la cellule photovoltaïque ayant été présentée, nous définirons, dans la suite, quelques facteurs pouvant influencer son fonctionnement.

### I-2-2-3. Facteurs influençant le fonctionnement d'une cellule Photovoltaïque :

#### a. Influence de l'ensoleillement ou irradiation :

L'apport d'énergie permettant la séparation électron-trou étant assuré par l'énergie lumineuse, il est donc normal que l'augmentation de l'ensoleillement  $E$  entraîne automatiquement l'augmentation des paires électron-trou séparées. Le courant débité  $I_{ph}$  est donc proportionnel à l'ensoleillement  $E$

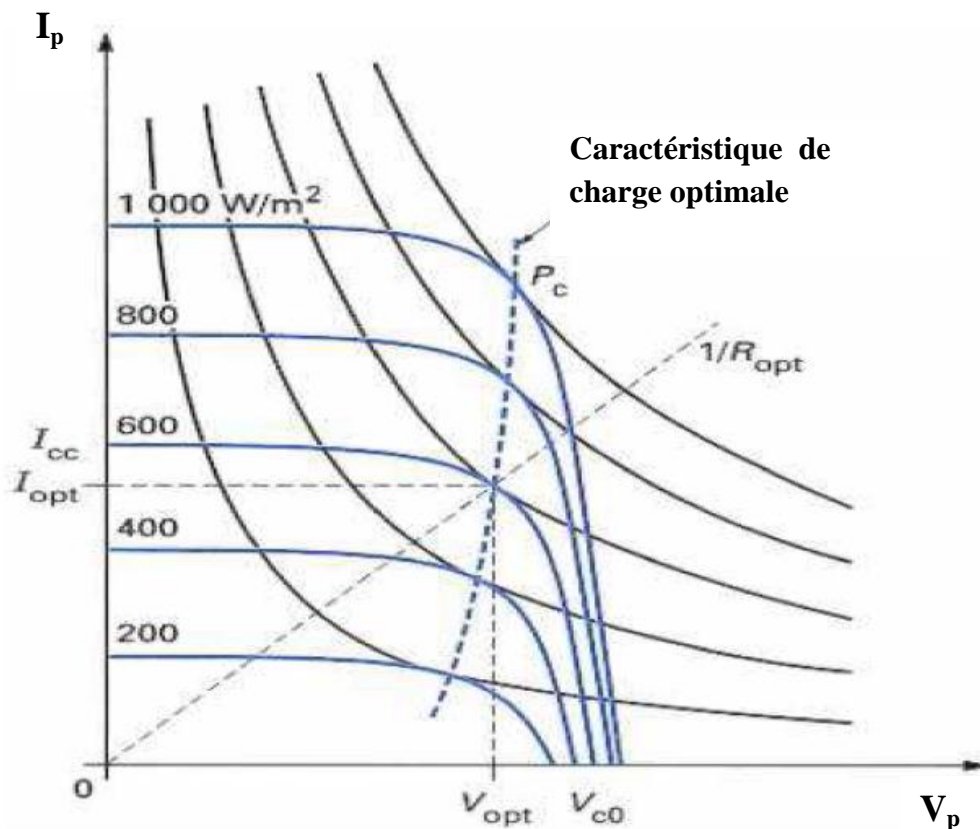


Fig. 1.10. Influence de l'ensoleillement.

**b. Influence de la température :**

La température a une influence notable sur le rendement d'une cellule photovoltaïque.

De manière générale, nous pouvons définir le coefficient de température pour une variable y de la façon suivante :

$$TC(y) = \frac{1}{y} \cdot \frac{\partial y}{\partial T} \dots\dots\dots(1.13)$$

Expérimentalement, on remarque que le courant de court circuit varie peu avec la température tandis que la tension à vide est beaucoup plus influencée (de l'ordre de - 0.4%/K). La température a donc une influence non négligeable sur le rendement d'une cellule photovoltaïque (perte de puissance de l'ordre de 9-15% pour une augmentation de 30°) Pour le même éclairement, les courbes I-V changent avec la température des cellules,

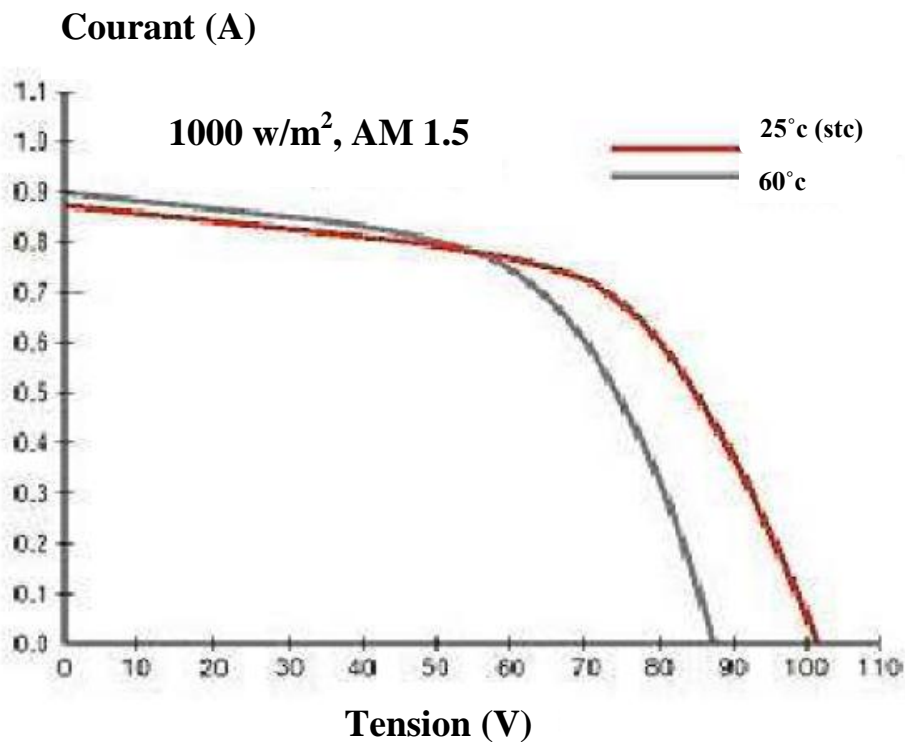


Fig. 1.11. Influence de la température sur un module.

**I-2-2-4. Caractéristique d'un module photovoltaïque :**

Pour utiliser les cellules dans un système photovoltaïque, on est amène à les associer en série pour augmenter la tension. Le courant est fixe par la surface de chaque cellule

élémentaire mais aussi par le nombre de cellule en parallèle. Cette association série parallèle doit se faire suivant des précautions car, même si les cellules sont identiques, il existe des dispersions au niveau de leurs paramètres internes. L'ajout d'une cellule en silicium en série correspond à une augmentation de la tension totale d'environ 0,6 V (tension de la jonction).

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par l'addition des tensions a courant donne.

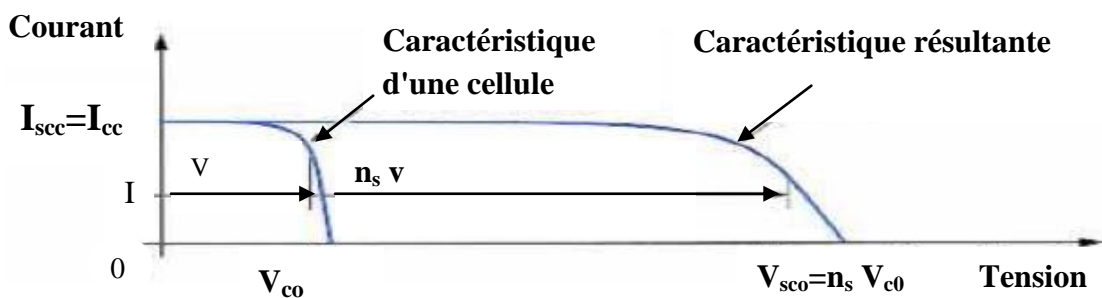


Fig. 1.12. Association en série de cellules identiques.

Les expressions de la tension ( $V_{mod}$ ) et du courant ( $I_{mod}$ ) du module PV sont :

$$V_{mod} = \sum V_{cel} \dots \dots \dots (1.14)$$

$$I_{mod} = I_{cel} \dots \dots \dots (1.15)$$

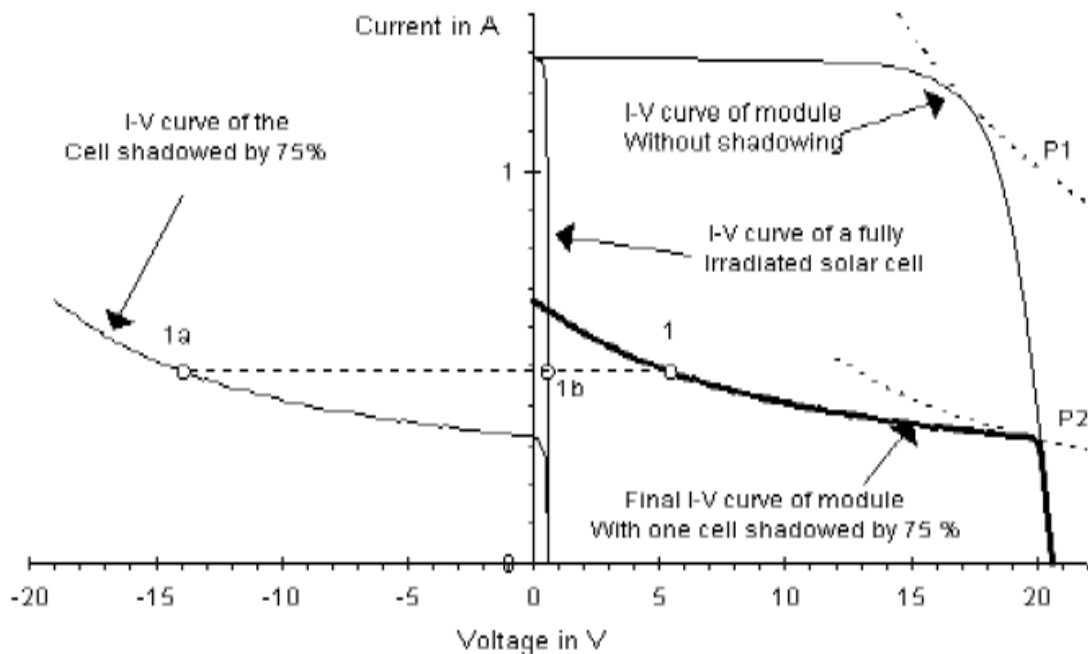
Où  $V_{cel}$  et  $I_{cel}$  sont respectivement la tension et le courant d'une cellule PV.

Au cas où toutes les cellules ne sont pas identiques, c'est la cellule la plus faible qui impose ses performances a tout le module, dégradant ainsi les performances de ce dernier. A titre d'exemple, on observe ce phénomène lorsque le module est en partie ombrage.

- **Cas particulier** : influence de l'ombre sur un module (éclairage non uniforme)

Lorsque des cellules identiques reçoivent des éclairagements différents (cas d'un ombrage partiel d'un module), il en résulte de mauvaises performances puisque c'est la cellule la moins éclairée qui impose ses performances aux autres. Ce phénomène est illustre à travers l'expérience suivante.

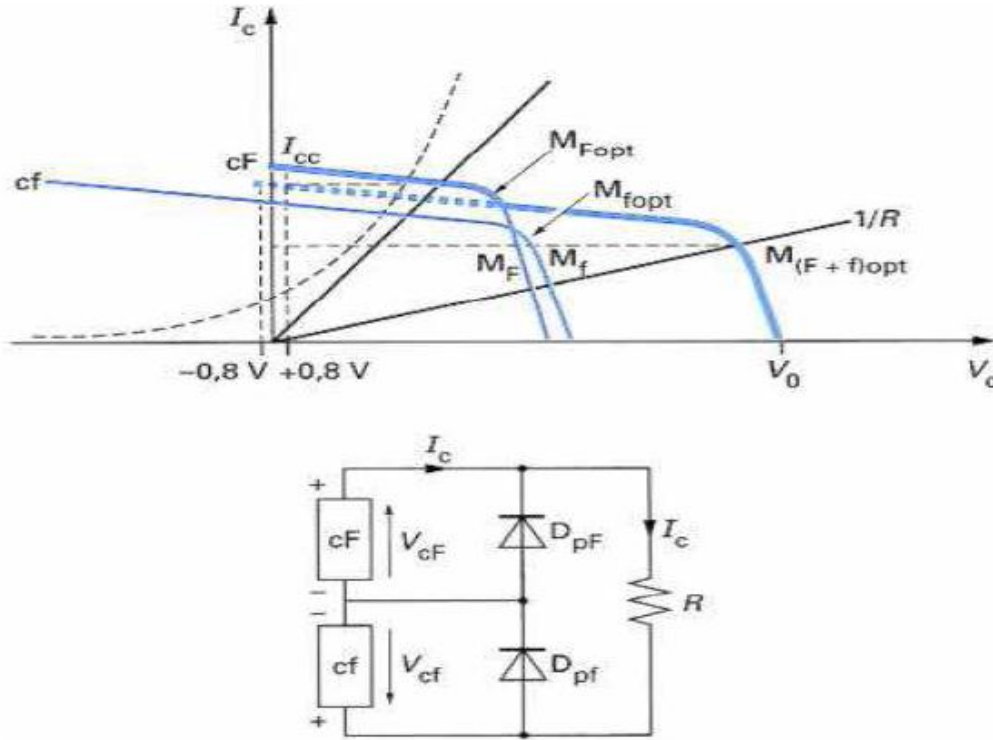
L'expérience a été effectuée sur un module de 36 cellules monocristallin de 10 cm sur 10 avec une cellule ombragée sur 75% de sa surface, les autres cellules étant éclairées normalement. La caractéristique I-V du module a été obtenue en additionnant les caractéristiques de toutes les cellules.



**Fig. 1.13.** Effet d'un éclairage non uniforme sur un module,  $E=407\text{W/m}^2$ ,  $T=300\text{K}$ .

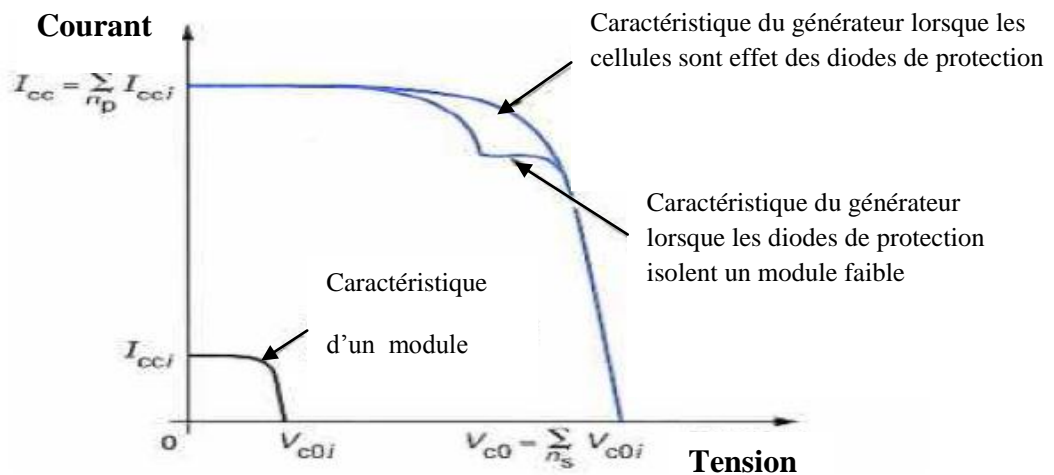
Sur tout le module, on a donc une zone d'ombre de seulement 2%, mais on voit que cela entraîne une baisse du point de puissance maximum de 70% ! Cette cellule ombragée apparaît donc comme une charge et en cas de court circuit elle subira une tension inverse égale à la tension des 35 autres cellules. Ceci peut donc entraîner la dégradation du module si la contrainte thermique est trop forte ou si la tension d'avalanche est dépassée.

L'utilisation d'une diode en parallèle aux bornes d'un groupement élémentaire de cellules en série, dite diode de by-pass, permet d'éviter cette dégradation. L'amorçage spontané de cette diode parallèle, dès l'apparition d'une tension en inverse aux bornes de ce groupement, limite cette dernière à la valeur  $V_d$  de la tension directe de conduction de la diode choisie et la puissance dissipée à  $V_d \times I_s$ . Le nombre de cellules de ce groupement élémentaire est choisi de façon à ne pas dépasser la tension d'avalanche relative à la technologie des cellules utilisées, soit 30 à 40 pour des cellules au silicium. De nombreux modules commercialisés incluent maintenant ces diodes parallèles de protection contre les tensions inverses.



**Fig. 1.14.** Modules protégés connectés en série : caractéristique résultante (cF=cellule forte, cf=cellule faible).

Pour une association en parallèle, nous avons un fonctionnement dual de celui de l'association en série. Finalement, la caractéristique d'une association série-parallèle se présente comme suit :



**Fig. 1.15.** Caractéristiques résultantes d'un générateur associant  $n_p$  cellules en parallèle et  $n_s$  cellules en série (identiques ou éventuellement disparates).

Il apparait donc qu'une association série-parallèle de cellules PV doit respecter des règles de Sécurité rigoureuses sous peine de voir dégrader les performances du modulé.

**I-3. Conclusions :**

A travers de ce chapitre, nous avons dressé un état des lieux de la production d'électricité photovoltaïque. Nous avons pu constater l'évolution avec laquelle le marché progressait dans ce contexte de crise énergétique ou l'on cherche à remplacer les énergies fossiles par le photovoltaïque, et où l'on assiste à une diversification des applications de cette énergie. En effet, réservée au début pour de petits sites isolés, on remarque de plus en plus l'accroissement des watt-crêtes par installation modifiant aussi les habitudes des utilisateurs.

Pour faire face à cette demande croissante de puissance, on peut avoir recours à une solution :

- Augmentation de la surface des panneaux PV.



## **CHAPITRE II:**

**MODELISATION DU SYSTEME**

**PHOTOVOLTAIQUE**

### II.1. Introduction :

Afin d'étudier en détail le fonctionnement d'un système photovoltaïque, nous nous proposons de le modéliser puis de le simuler à l'aide du logiciel de calcul scientifique Matlab – Simulink. Dans le chapitre précédent, nous avons énuméré les différents composants d'un tel système. Nous présentons donc ici grâce à des choix adaptés (type de modèle des composants, pas de calcul...), le modèle d'un système photovoltaïque.

Dans la première partie de ce chapitre, nous présentons brièvement l'architecture de notre système photovoltaïque. Dans la deuxième partie nous dimensionnons le système que nous modélisons ensuite. Finalement, nous présentons le modèle complet de notre système et discutons de ses performances.

### II.2. Synthèse des architectures de systèmes Photovoltaïques autonomes :

Un système photovoltaïque (PV) autonome est composé dans son ensemble d'un :

- générateur photovoltaïque (panneaux photovoltaïques),
- moyen de stockage : électrochimique (batteries) ou électrique (super capacités),
- module de contrôle pour la charge des batteries et l'acquisition des différentes grandeurs physiques du système
- convertisseur continu/continu (CC) permettant d'alimenter le bus continu et de poursuivre le point de puissance maximum,
- transformateur permettant d'élever la tension pour la conversion continu/ alternative,
- convertisseur CC/CA permettant d'alimenter les charges alternatives,

Le schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque se présente alors comme suit :

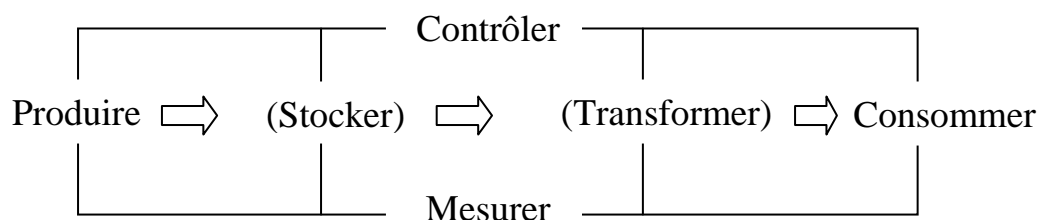
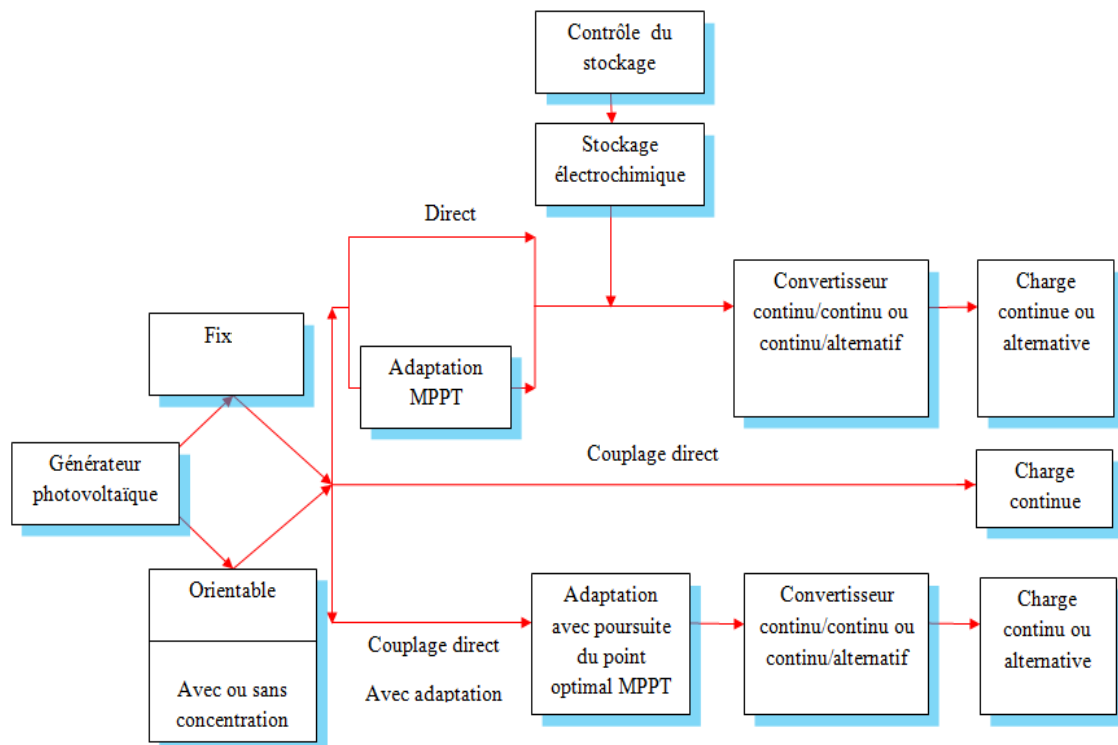


Fig.2.1. Schéma fonctionnel d'un système photovoltaïque.

Dans un système PV basique, l'énergie produite est directement consommée par l'utilisateur ; les fonctions « Stocker » et « Transformer » dépendent de l'application visée.

La figure **Fig.2.2** détaille les différentes configurations de systèmes photovoltaïques.



**Fig.2.2.**Présentation générale d'un système photovoltaïque.

### II-2-1. Alimentation directe sans transformation :

Dans un système avec alimentation directe sans transformation, les panneaux photovoltaïques sont directement couplés à la charge. En se référant à la **Fig.2.2**, les fonctions du système se limitent des lors à produire et consommer. Ce cas de figure présente autant d'avantages que d'inconvénients ; en effet, le système présente l'avantage d'être simple et d'un cout relativement bas et s'avère très intéressant pour des applications pour lesquelles les besoins en énergie coïncident avec la présence de lumière (exemple d'un ventilateur). Par contre le fait que les panneaux soient directement couplés à la charge entraine un surdimensionnement puisqu'il faudra produire autant d'énergie lors de faibles ensoleillement.

### II-2-2. Alimentation directe avec transformation :

L'alimentation directe avec transformation est similaire au cas précédent à la seule différence qu'il existe un étage d'adaptation de l'énergie entre la source (panneaux photovoltaïques) et la charge. Cet étage d'adaptation permet de transformer l'énergie produite afin d'alimenter la charge. Ainsi, selon le type de charge, nous avons comme étage d'adaptation des convertisseurs DC/DC et/ou DC/AC. Malheureusement, l'alimentation directe impose un fonctionnement au fil du soleil, c'est-à-dire que l'énergie produite est fonction du rayonnement solaire.

### II-2-3. Système autonome avec stockage :

C'est le système le plus répandu. Le composant de stockage permet d'emmagasiner de l'énergie et de la restituer à la charge lorsque le rayonnement solaire est faible ou absent (pendant la nuit). Il existe divers composants de stockage, dont les plus répandus, les batteries électrochimiques, le stockage d'hydrogène, les volants d'inerties, les super capacités, ont été présentes au chapitre III.

Nous nous intéresserons à ce type de système dans la suite.

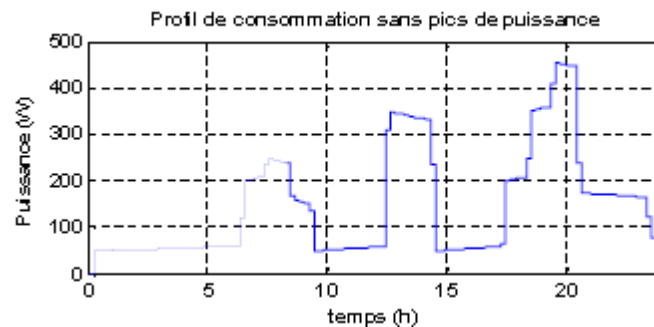


Fig.2.3. Profil de consommation sans pics de puissance (Profil 1)

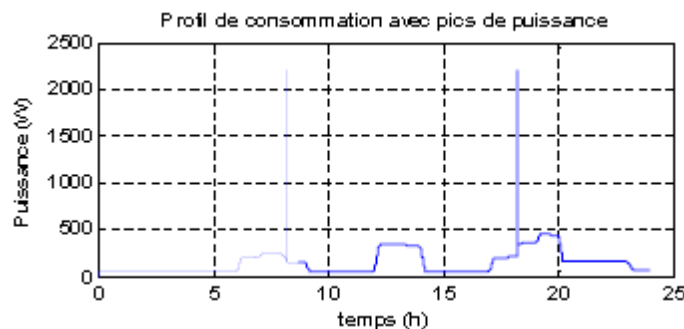


Fig.2.4. Profil de consommation avec pics de puissance de 2,3kW (Profil 2)

Dans la suite, nous désignerons le profil sans pics de puissance par le Profil 1, et celui avec pics, le Profil 2.

### **II-3. Dimensionnement énergétique du système photovoltaïque :**

Toute modélisation d'un système nous conduit à définir des critères prioritaires rendant compte du comportement du dit système. Ainsi, la volonté de faire ressortir le comportement d'un composant face à une sollicitation donnée nous amène à privilégier tel ou tel aspect de ce composant lors de la modélisation, simplifiant ainsi le travail.

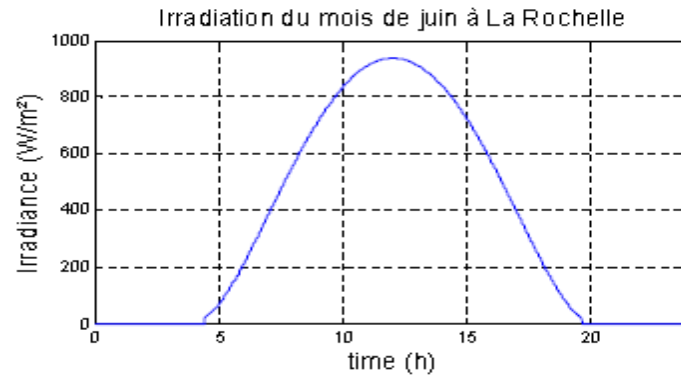
#### **II.3.1. Profil de consommation :**

Pour rendre compte de l'utilisation de l'électricité produite, nous avons défini un profil basé sur les habitudes de consommation d'une famille type en Europe. Ce profil tient compte des périodes d'utilisation au cours de la journée des appareils comme le réfrigérateur basse consommation, le congélateur... . Nous avons défini deux types de profil, l'un ne tenant pas compte des appels de puissance pouvant survenir lors de la mise sous tension des appareils et l'autre rendant compte de ces surintensités.

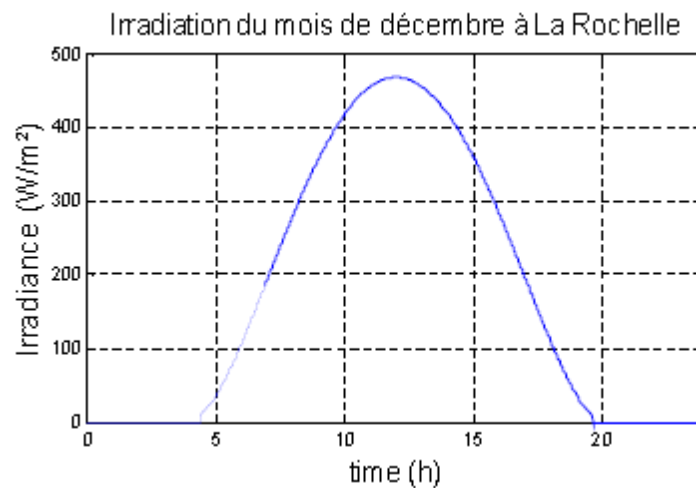
L'introduction des pics de puissance permet de montrer les contraintes que subissent les batteries en fonctionnement normal ; en effet lors de la mise sous tension des machines on assiste à des appels de courant pouvant atteindre 4 fois la valeur nominale.

#### **II-3-2. L'ensoleillement :**

Le but de notre étude est de faire ressortir l'importance du module de stockage dans le système global ; le profil d'ensoleillement devra donc pouvoir rendre compte de l'intensité d'éclairement du soleil à différentes heures de la journée. La source d'énergie de notre système étant le soleil, il est important d'apporter un soin particulier au profil d'ensoleillement. Ce profil journalier utilisé est obtenu par extrapolation de données mesurées à intervalles réguliers (30mn) tout au long de la journée par ciel dégagé.



**Fig.2.5.** Irradiation au mois de juin a La Rochelle.



**Fig.2.6.** Irradiation au mois de décembre a La Rochelle.

### II-3-3. Dimensionnement du système PV :

Le dimensionnement ayant une incidence sur le prix, la qualité et la pérennité du système PV en site isolé, il constitue donc une étape cruciale lors de la mise en place du système. Il dépend :

- de l'ensoleillement sur le site au cours de l'année,
- de l'énergie requise par chaque récepteur à alimenter,
- du rendement énergétique de l'ensemble des composants y compris le stockage.

Il est alors évident qu'une demande importante en énergie augmentera la taille et le coût du système tandis que le choix de composants à haut rendement énergétique permettra de les réduire.

D'une manière générale, le dimensionnement devra suivre les étapes suivantes :

- évaluation des besoins énergétiques,
- dimensionnement des panneaux PV,
- dimensionnement du stockage,
- dimensionnement des convertisseurs.

**II-3-3-1. Dimensionnement du champ PV :**

Le système a été dimensionné pour satisfaire aux besoins journaliers de consommation, évaluée à 2950Wh (hors chauffage, cuisson...) et comprenant l'éclairage, les appareils électroménagers de faible consommation (réfrigérateur, congélateur de classe A), l'audiovisuel... d'une habitation type d'une famille de 4 personnes. Les composants du système et l'évaluation de leurs consommations énergétiques sont les suivants :

**- Eclairage basse consommation**

- 4 lampes fluo compactes de 15W, 4h/jour,
- 1 lampe halogène 35W, 2h/jour.

**- Electroménager**

- Réfrigérateur (+2°C) armoire de 229l classe A : 70W, 10h/jour,
- Congélateur (-30°C) coffre de 200l classe A : 120W, 10h/jour,
- Lave linge sans chauffage capacité 5kg : 300W, 1h/jour.

**- Audio visuel**

- Chaîne stéréo : 50W, 2h/jour,
- Magnétoscope/lecteur DVD : 30W, 3h/jour,
- TV 42cm : 50W, 3h/jour.

**- Informatique**

- Pc portable : 30W, 3h/jour.

Le dimensionnement des panneaux PV se fait suivant la formule suivante :

$$p_c = \frac{B_j}{E_j \cdot \eta_b \cdot \eta_i} \dots\dots\dots(2.1)$$

Avec :

$p_c$  : Puissance crête des panneaux PV [W],

$E_j$  : Rayonnement moyen quotidien du mois le plus défavorable [kWh/m<sup>2</sup>/j],

$\eta_b$  : Rendement électrique des batteries,

$\eta_i$  : Rendement électrique de l'installation (tenant compte des différentes pertes et des convertisseurs).

Ces équipements demandent une puissance de 745W et une consommation de 2940Wh/jour. Lors des phases transitoires (phase de démarrage) et si tous les appareils démarrent en même temps, le pic de puissance peut atteindre 2500W.

### II-4. Modélisation des composants du système :

Il existe de nombreux modèles pour représenter les composants du système ; nos choix se sont portés sur des modèles jugés adéquats à notre système, c'est-à-dire, permettant de tenir compte des interactions entre les différents éléments tout en donnant lieu à une modélisation simple du système global.

#### II-4-1. Le générateur photovoltaïque :

Comme défini dans le chapitre précédent, une cellule photovoltaïque idéale peut être décrite de manière simple comme une source idéale de courant qui produit un courant  $I_{ph}$  proportionnel à la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode. En addition au modèle idéal, le modèle réel tient compte des propriétés résistives de la cellule qui sont modélisées par une résistance série  $R_s$  mais aussi des courants de fuites modélisés par une résistance parallèle  $R_p$ .

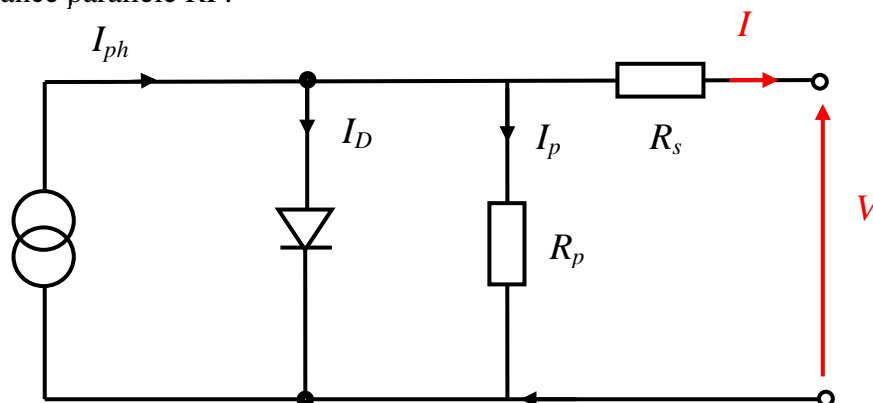


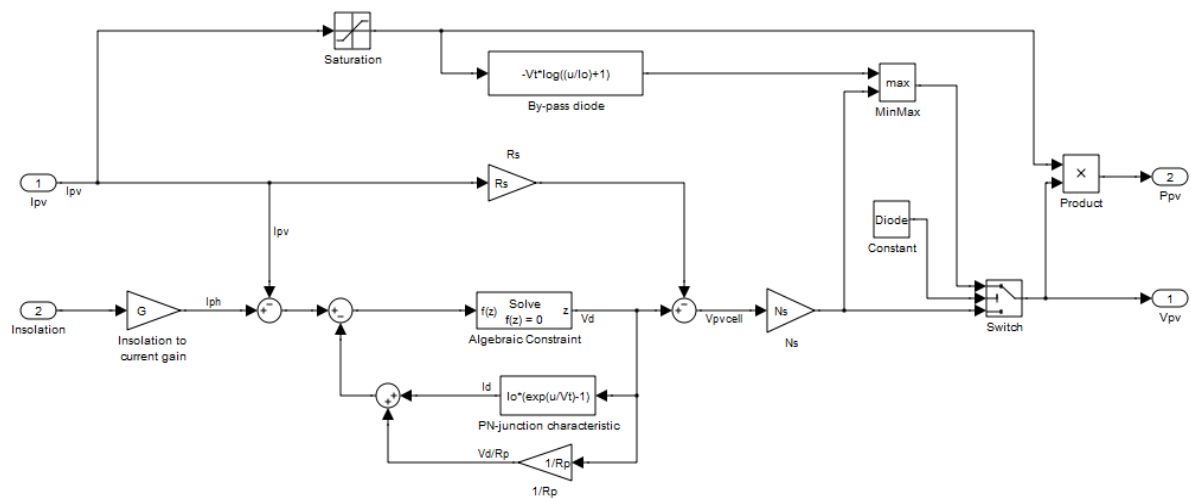
Fig.2.7. Modèle de la cellule PV.

## CHAPITRE II MODELISATION DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE

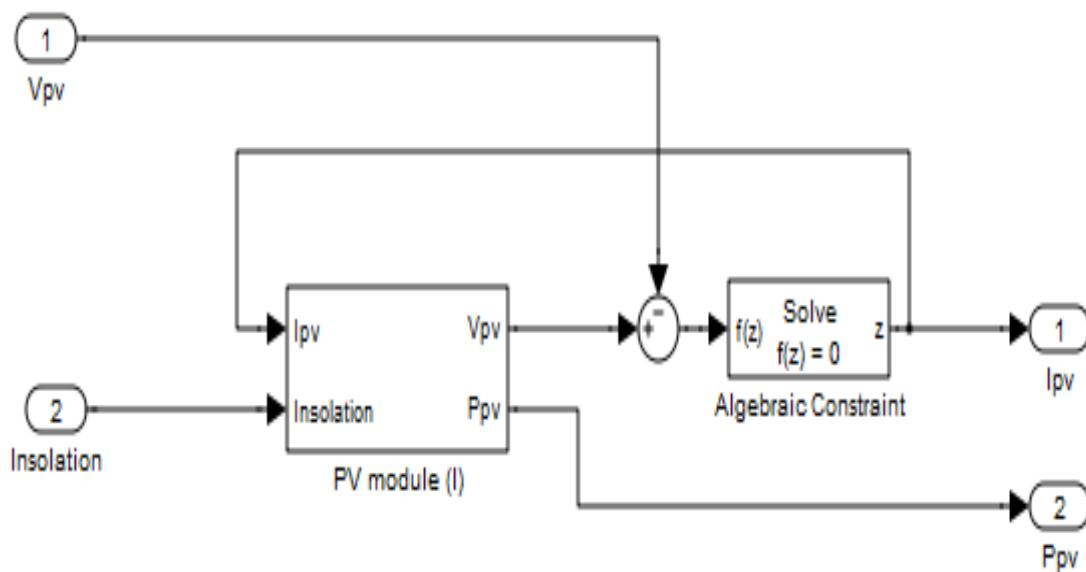
Ce modèle qui permet de tenir compte de l'influence de la température et de l'ensoleillement a été implémenté sous Matlab Simulink (**Fig.2.8**) ; il a comme paramètres d'entrée : la tension aux bornes des panneaux PV, l'ensoleillement et la température.

Notons que lors des simulations, la tension des panneaux est calculée à chaque instant et réutilisée comme paramètre d'entrée. La **Fig.2.9** montre l'influence de la température et de l'ensoleillement sur la caractéristique courant – tension (I-V) d'une cellule unitaire d'un module ECEN2060Solar. Pour obtenir ces différentes caractéristiques, un balayage de la tension des panneaux de 0 à  $V_{co}$  (tension en circuit ouvert) a été effectué.

### Etape 1 :



### Etape :2



Etape :3

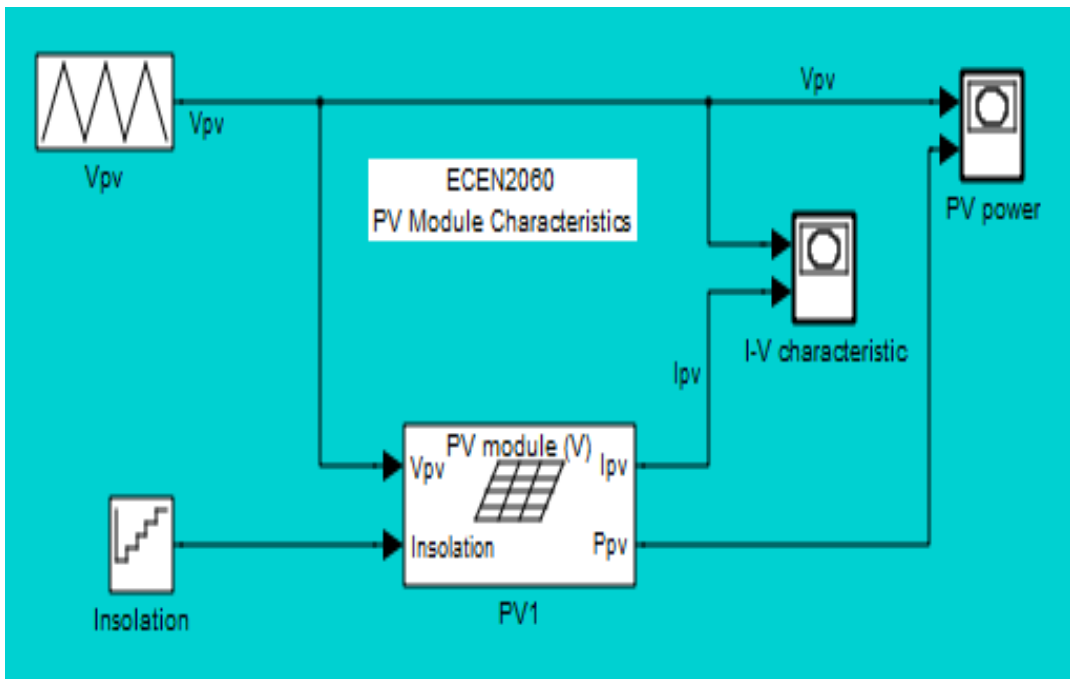
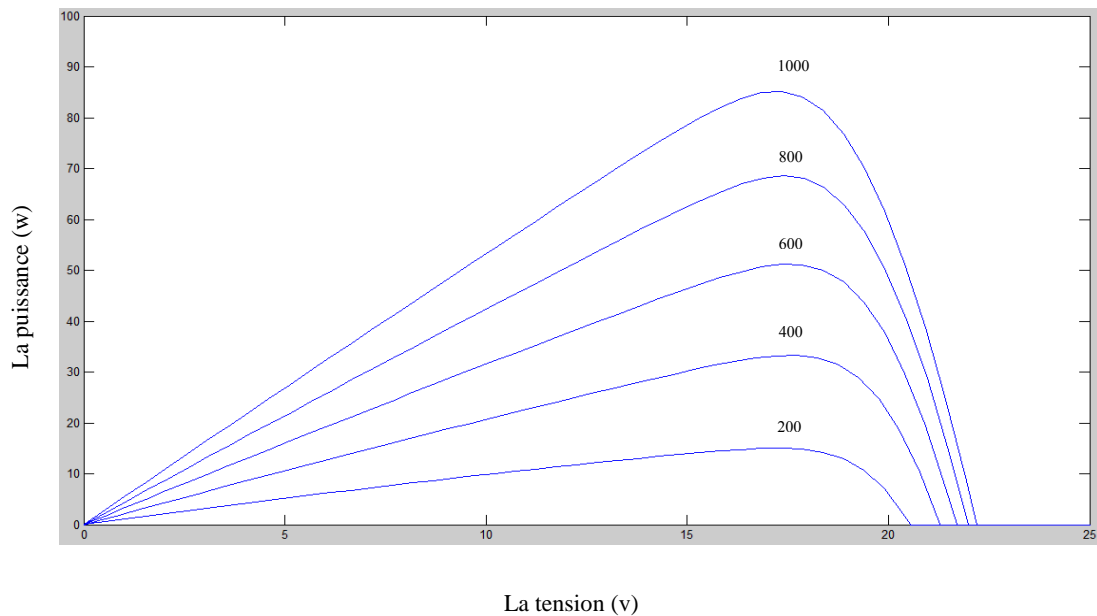
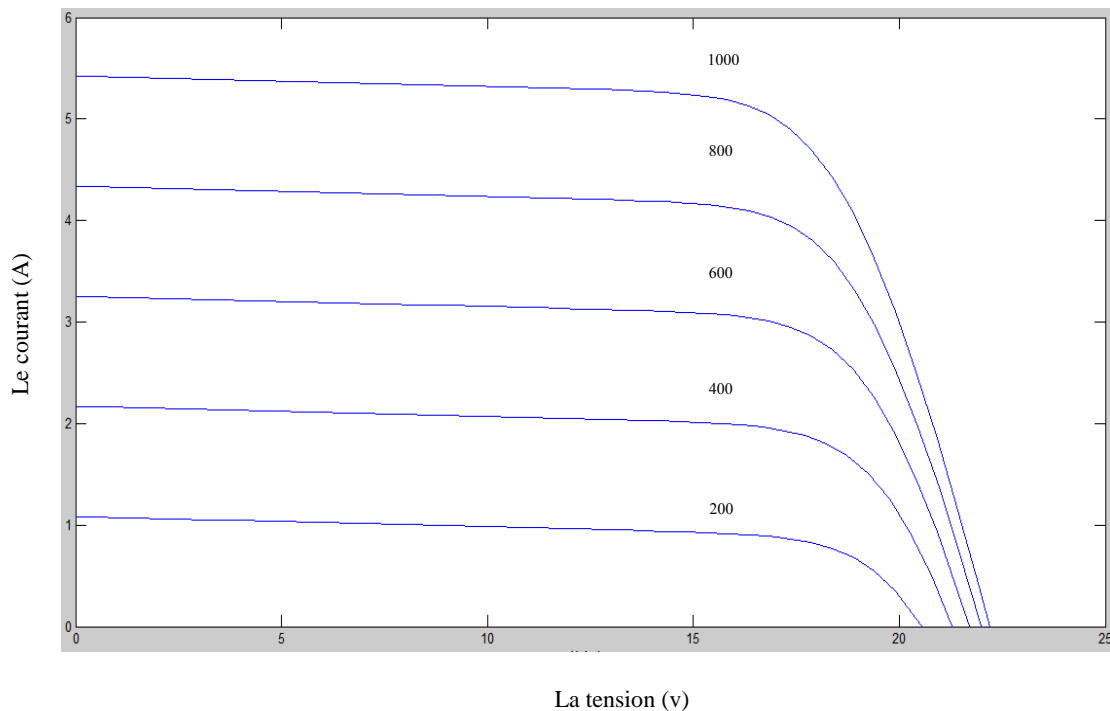


Fig.2.8.Les Etapes de modélisation d'un système PV sous Matlab (ECEN2060).



(a)



(b)

**Fig.2.9.**Influence de l'ensoleillement sur la caractéristique :

(a) P-Vet (b)I-V d'une cellulePV.

Nous remarquons que le courant débité par la cellule est proportionnel à l'ensoleillement. La cellule PV étant le composant unitaire d'un module PV, nous verrons dans le prochain paragraphe la modélisation des panneaux PV.

- **Les panneaux photovoltaïques**

Un panneau photovoltaïque ou module photovoltaïque est obtenu à partir de la mise en parallèle et/ou série de plusieurs cellules PV. Il existe sur le marché des puissances normalisées de modules PV, on peut ainsi retrouver des modules de puissance nominale 50W, 100W ou encore 165W. Suivant le cahier de charges, et pour des raisons de simplicité, le module PV de 100W est modélisé avec un seul bloc Simulink. Les expressions du courant débité par le module PV et la tension à ses bornes sont données par les équations suivantes :

$$I_m = N_p \cdot I \dots \dots \dots (2.3)$$

$$I_{phm} = N_p \cdot I_{pn} \dots \dots \dots (2.4)$$

$$V_m = N_s \cdot V \dots \dots \dots (2.5)$$

$$V_{com} = N_s \cdot V_{co} \dots \dots \dots (2.6)$$

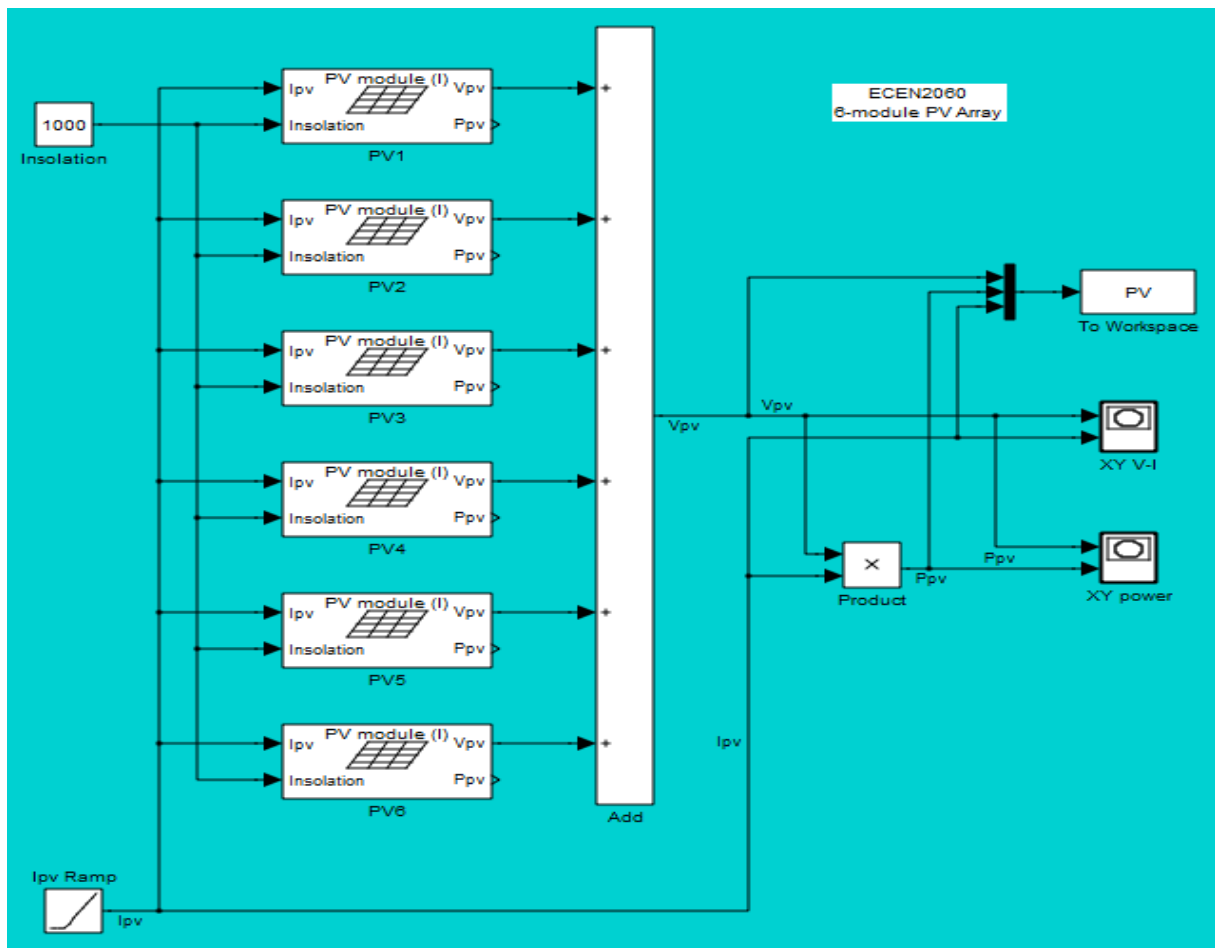
Avec :

$N_s$  : Le nombre de cellules connectées en série,

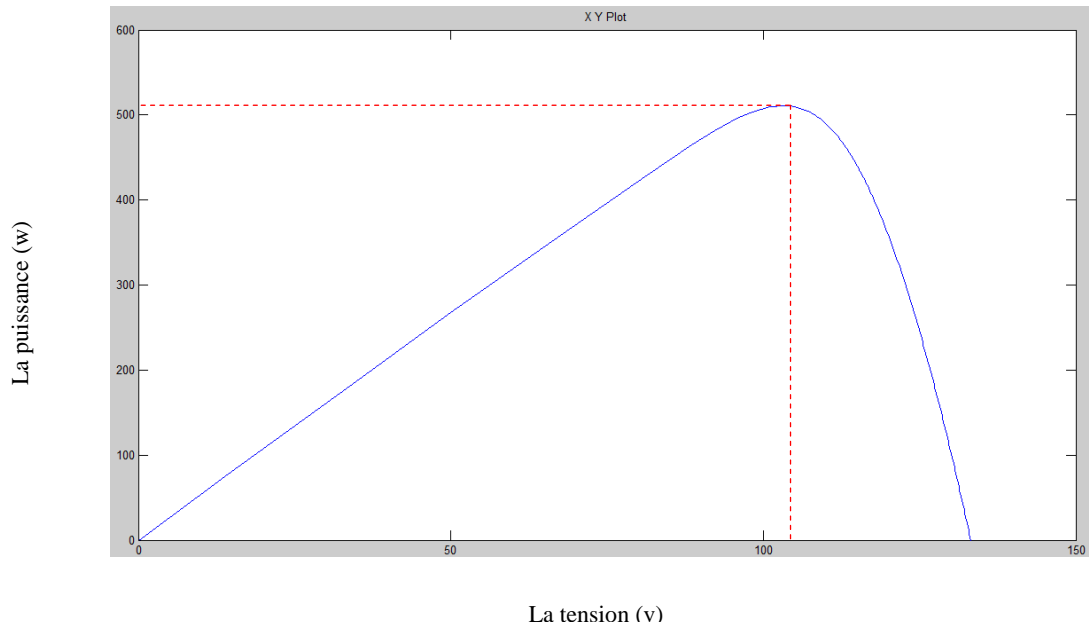
$N_p$  : Le nombre de cellules connectées en parallèle,

$I_{phm}$  : Le courant de court circuit du module,

$V_{com}$  : La tension en circuit ouvert du module.

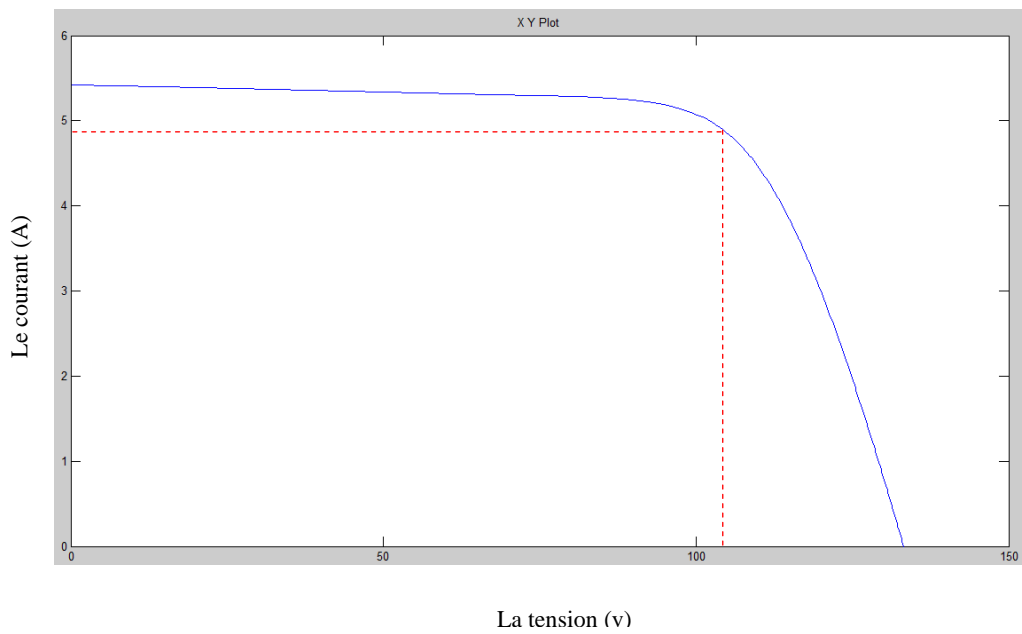


**Fig.2.10.** Modèle Simulink d'un module PV de 1000W/m<sup>2</sup>.



$P_{MPP} = 512 \text{ W}$

$V_{MPP} = 105 \text{ V}$

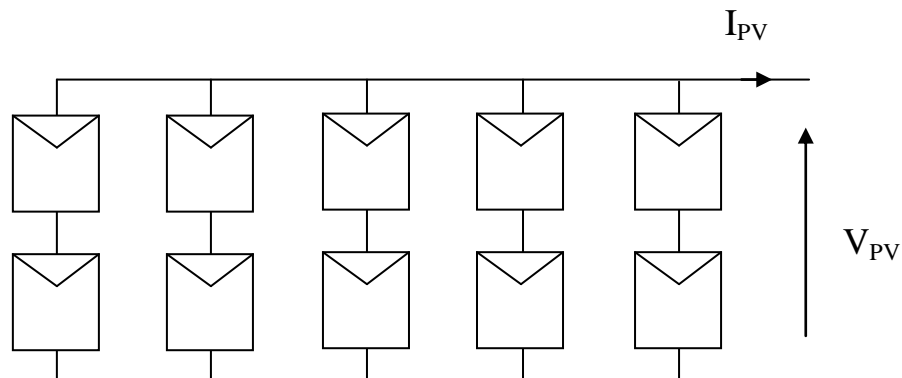


$I_{MPP} = 4,9 \text{ A}$

$V_{MPP} = 105 \text{ V}$

**Fig. 2.11.**Caractéristiques I-V et P-V du module PV

Au point de puissance maximum, la valeur de la puissance est de 100Wc ; pour obtenir 1000Wc, nous disposerons par exemple 10 modules (5 en parallèle et 2 en série, **Fig.2.12.**).



**Fig.2.12.** Configuration de la Source PV du Système

Les diodes d'anti-retour ne sont pas représentées sur cette figure.

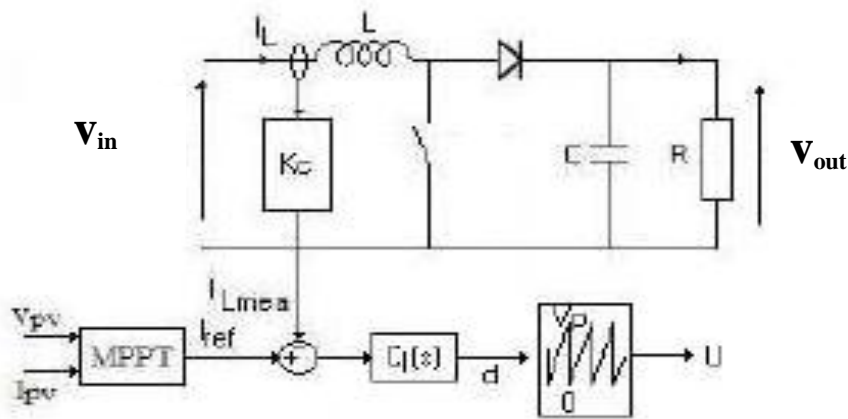
### II-4-2. Les convertisseurs d'énergie :

Le système PV que nous voulons modéliser, comprend deux convertisseurs :

- un hacheur boost dédié à la conversion de l'énergie provenant des panneaux PV
- un convertisseur permettant d'adapter la tension du bus continu à celle de l'utilisateur.

Dans un souci de simplification, nous supposons que le convertisseur au niveau de l'utilisateur est parfait ; ceci nous permet de nous affranchir de ce convertisseur lors des simulations et d'appliquer ainsi directement une consigne en puissance au niveau du module de commande. Le convertisseur que nous allons décrire dans la suite est donc un hacheur élévateur de tension ou hacheur boost (**Fig2.13.**).

D'après le cahier de charge, les panneaux PV fournissent une tension de 35V (deux panneaux en série) au point de puissance maximale, le hacheur boost a donc pour rôle d'élever la tension des panneaux à la valeur de la tension du bus continu qui est de 48V dans notre cas. Ce choix a été guidé d'une part par un aspect sécuritaire (basse tension en continu) et d'autre part par le souci de minimiser les pertes dans les convertisseurs en choisissant comme interrupteurs des transistors MOS et des diodes Schottky. Dans cette partie, nous considérons qu'un dispositif MPPT est intégré à la commande du hacheur et permet de maintenir la tension des panneaux PV à la tension  $V_{mpp}$  (tension au point de puissance maximale). Dans les paragraphes suivants, nous décrivons le fonctionnement et le dimensionnement du hacheur boost sur une charge R.



**Fig2.13.** Hacheur boost avec sa commande.

En mode de conduction continue, quand l'interrupteur S est ferme, la diode D ne voit passer aucun courant,  $V_{in}$  est alors appliqué à travers l'inductance L. Lorsque S s'ouvre, le courant accumulé dans l'inducteur passe par D en direction de la charge R, entraînant ainsi une tension de sortie  $V_{out}$  supérieure à la tension d'entrée.

Les équations électriques du hacheur boost s'écrivent :

$$L \cdot \frac{dI_L}{dt} = V_{in} - (1-d) \cdot V_{out} \dots \dots \dots (2.7)$$

$$C \cdot \frac{dV_{out}}{dt} = (1-d) \cdot I_L - \frac{V_{out}}{R} \dots \dots \dots (2.8)$$

En valeurs moyennes, la tension de sortie est fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique moyen  $D_0$ . Son expression est donnée par l'équation (2.9). La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique, D.

$$V_{out-av} = \frac{V_{in-av}}{1 - D_0} \dots \dots \dots (2.9)$$

- Dimensionnement des composants

A partir d'une tension d'entrée de 35V, nous souhaitons avoir en sortie une tension de 48V avec une puissance nominale de 1000W. La fréquence de commutation du convertisseur est de 20kHz. Le calcul des composants L et C se fait grâce aux expressions suivantes :

$$D_0 = 1 - \frac{V_{in-av}}{V_{out-av}} \dots\dots\dots(2.10)$$

$$L = \frac{D_0 \cdot V_{in-av}}{F \cdot \Delta I} \dots\dots\dots(2.11)$$

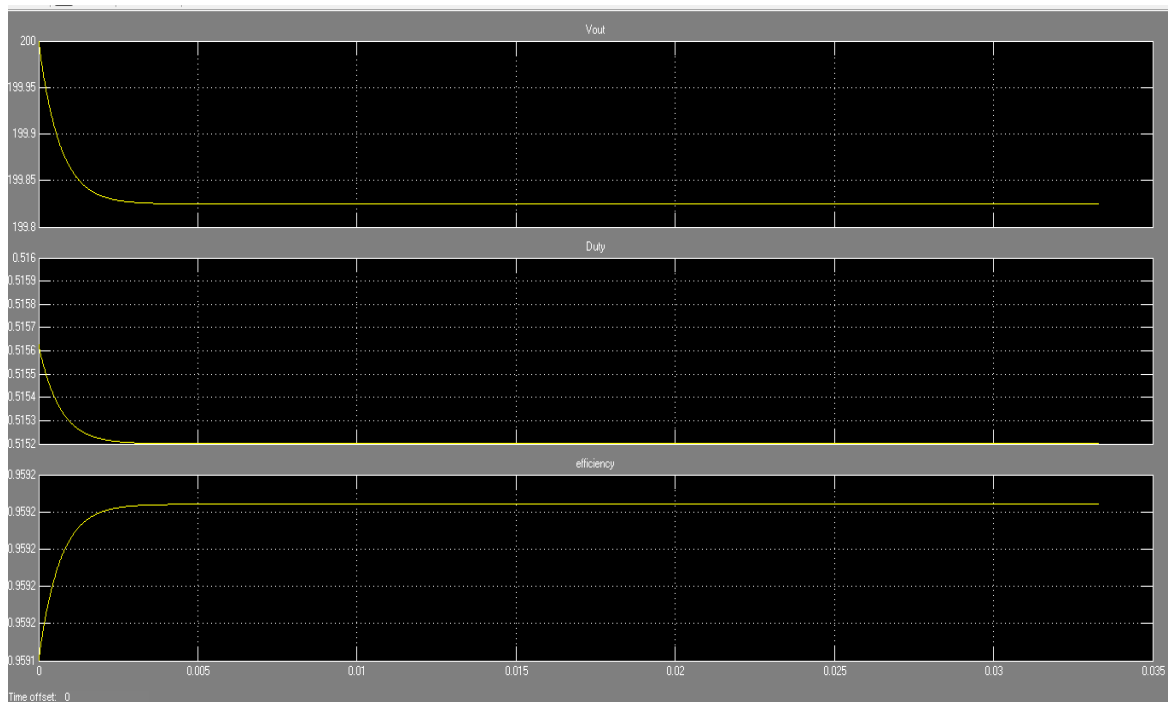
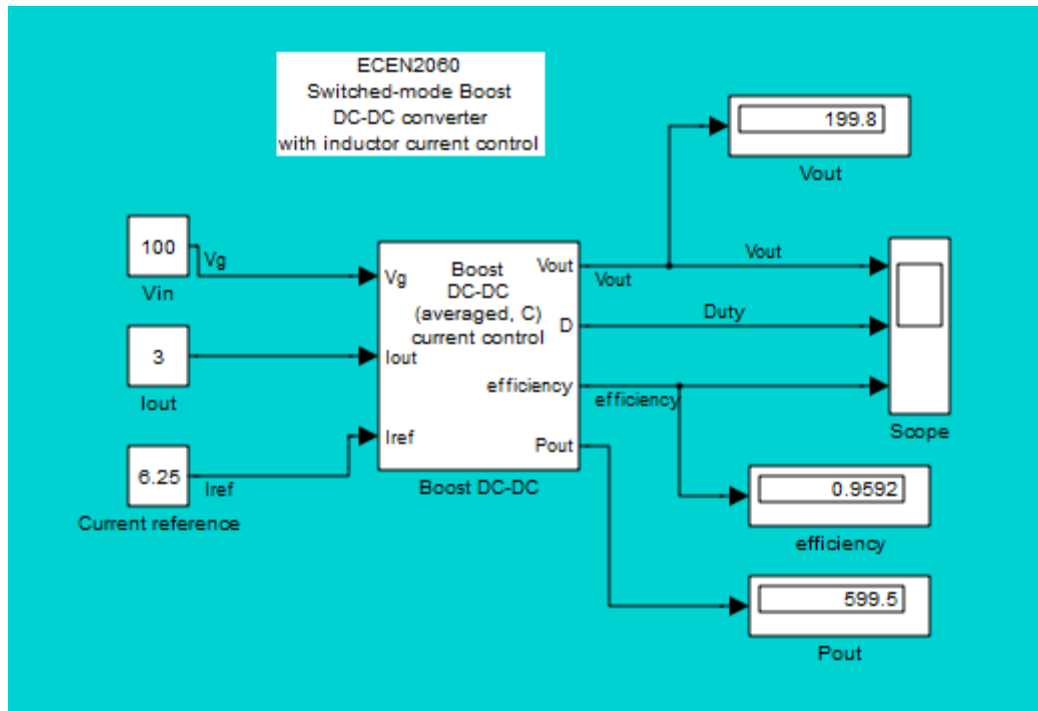
$$C = \frac{D_0 \cdot I_{max}}{F \cdot \Delta V_{out}} \dots\dots\dots(2.12)$$

Avec  $\Delta I=1A$  et  $\Delta V_{out}=0.1V$ , les oscillations du courant dans l'inductance et de la tension de sortie autour de leurs valeurs moyennes.

Nous obtenons ainsi le tableau récapitulatif suivant avec le rapport cyclique  $D_0=28\%$  qui permet de passer de la tension des panneaux ( $V_{in}=35V$ ) a la tension du bus continu ( $V_{out}=48V$ ) :

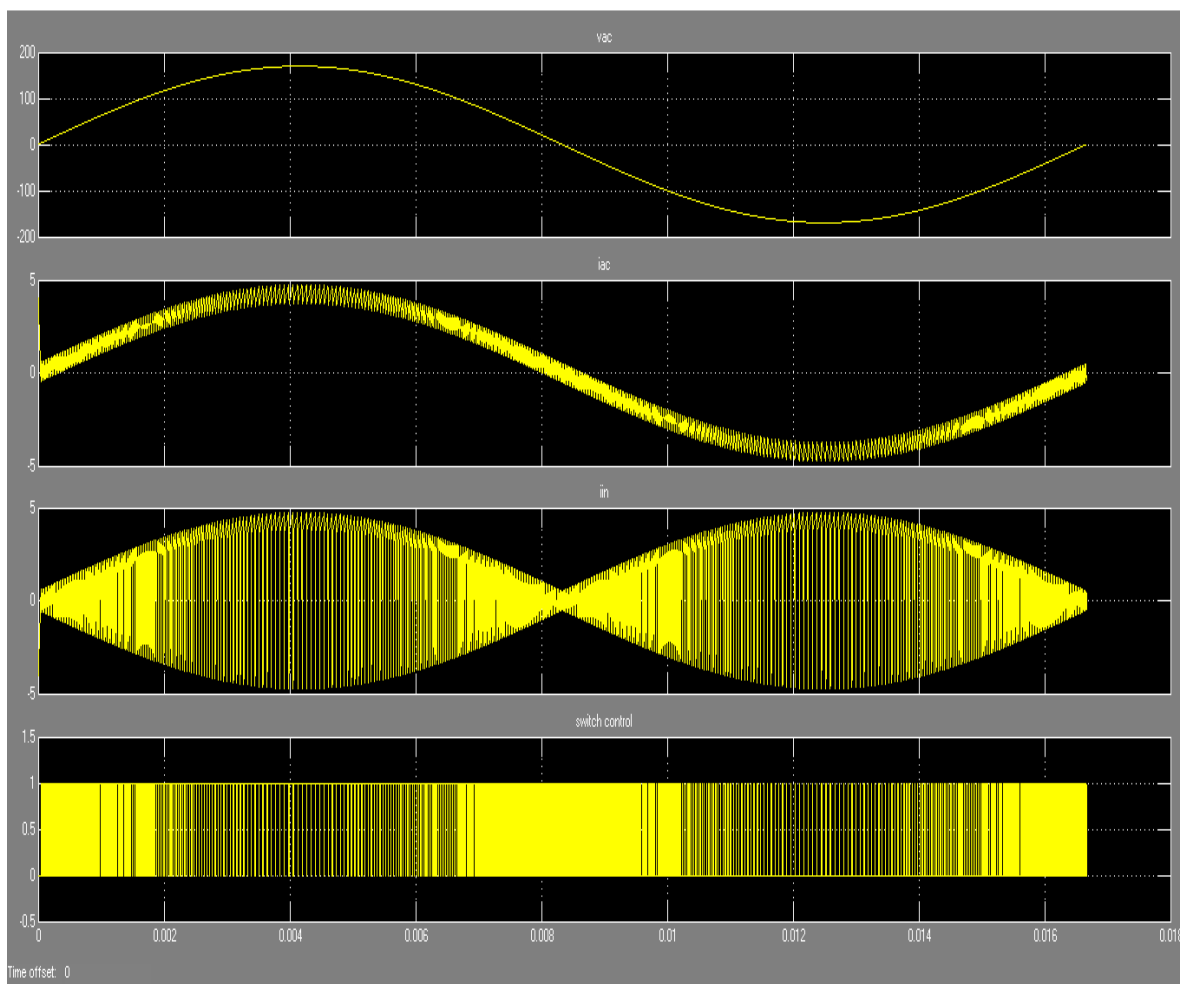
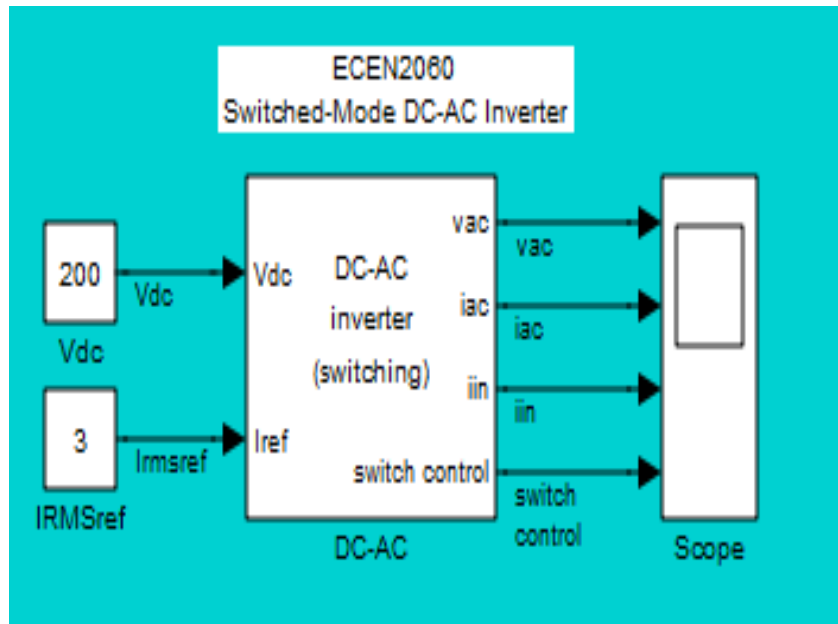
$F$ (KHz)	$V_{in}$ (V)	$I_{in}$ (A)	$V_{out}$ (V)	$I_{out}$ (A)	$P$ (w)	$L$ (H)	$C$ (F)
20	35	29.4	48	20.83	1000	4.95e-4	4.2e-3

**Tab2.1.** Récapitulatif des paramètres du système.



$V_{out}$	$P_{out}$	Efficacité
199,8 V	599,5 W	0.9592

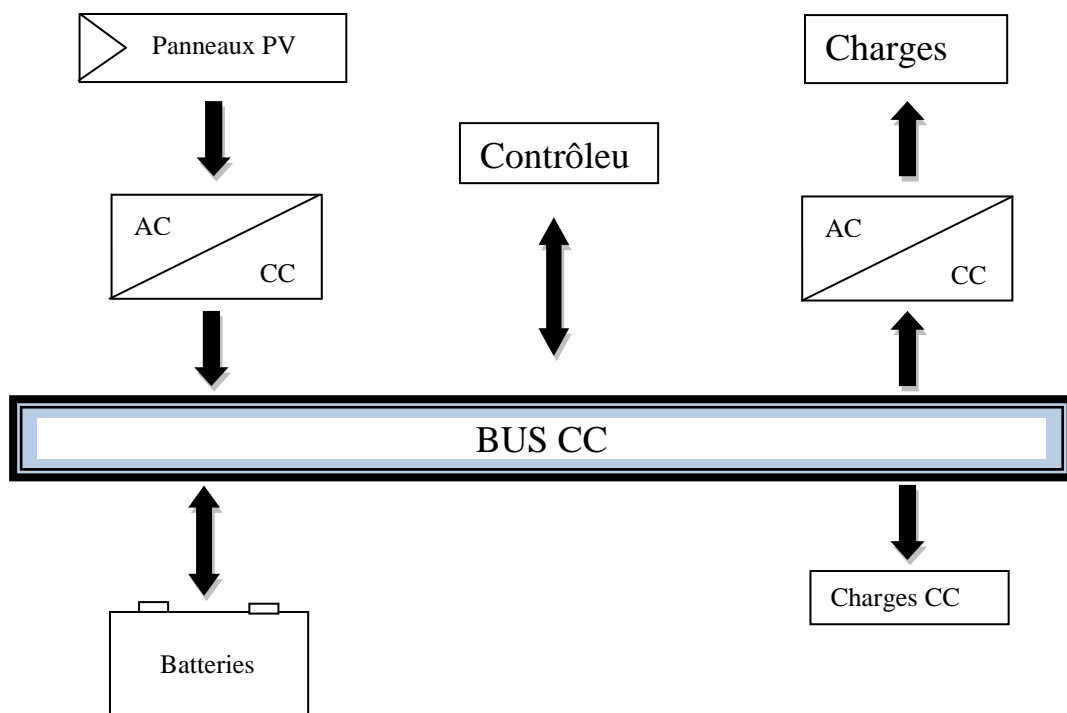
Fig 2.14. Un hacheur boost dédiée à la conversion de l'énergie provenant des panneaux PV.



**Fig.2.15.**Un convertisseur permettant d'adapter la tension du bus DC/AC a celle de l'utilisateur.

### II-5. Simulation du système photovoltaïque : évaluation des performances du système :

Dans toute étude système, le niveau de modélisation et le choix de l'outil de simulation revêt une importance capitale. Entre une commutation de transistor de l'ordre de  $1\mu\text{s}$  et une constante de temps électrique d'une batterie électrochimique, il existe un rapport supérieur à  $10^6$ . Un simulateur à pas variable semble, a priori, bien adapté à cette exigence en termes de compromis précision – rapidité sur des modèles dits "instantanés".



**Fig.2.16.** Synoptique du système PV avec stockage d'énergie.

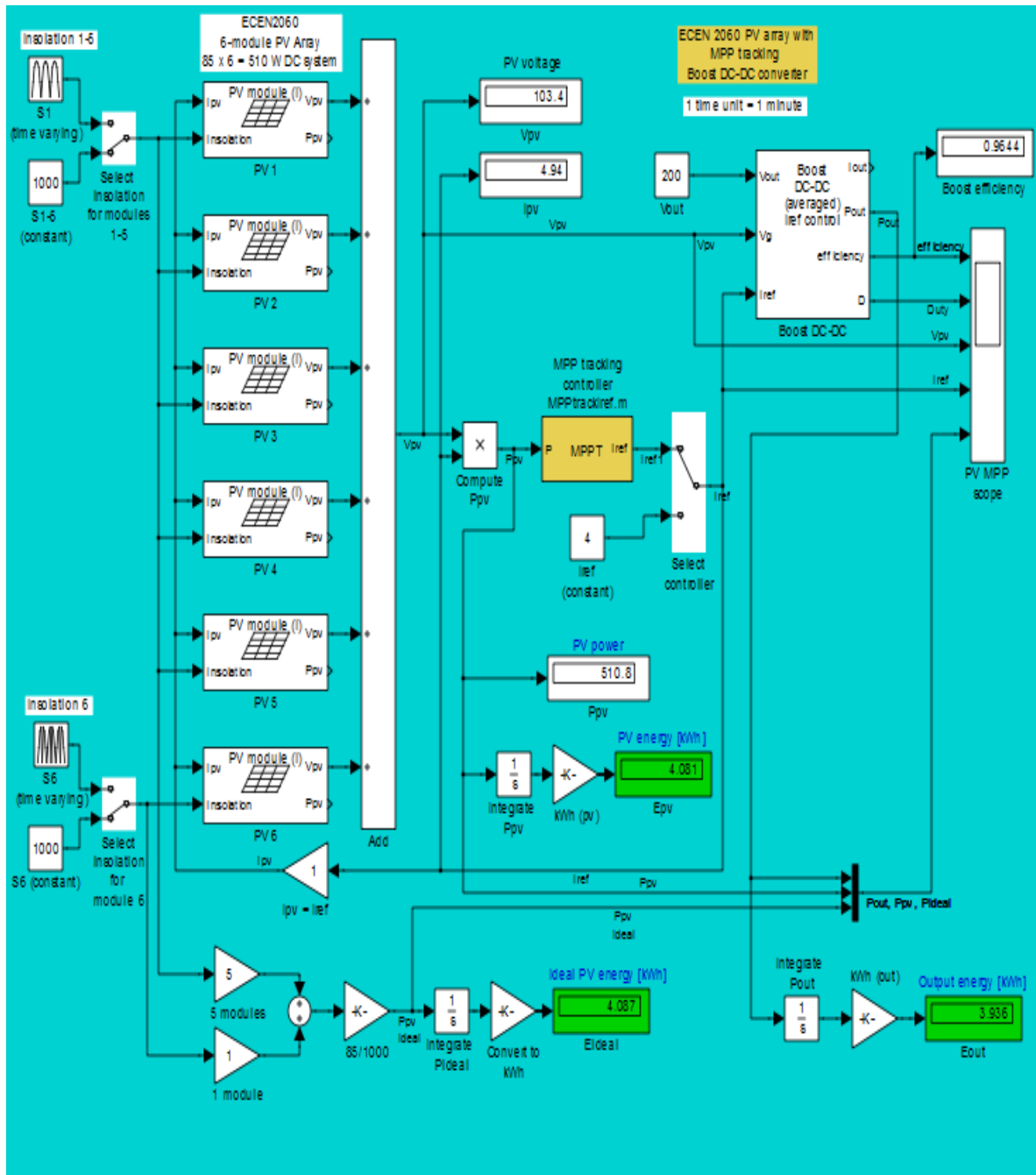
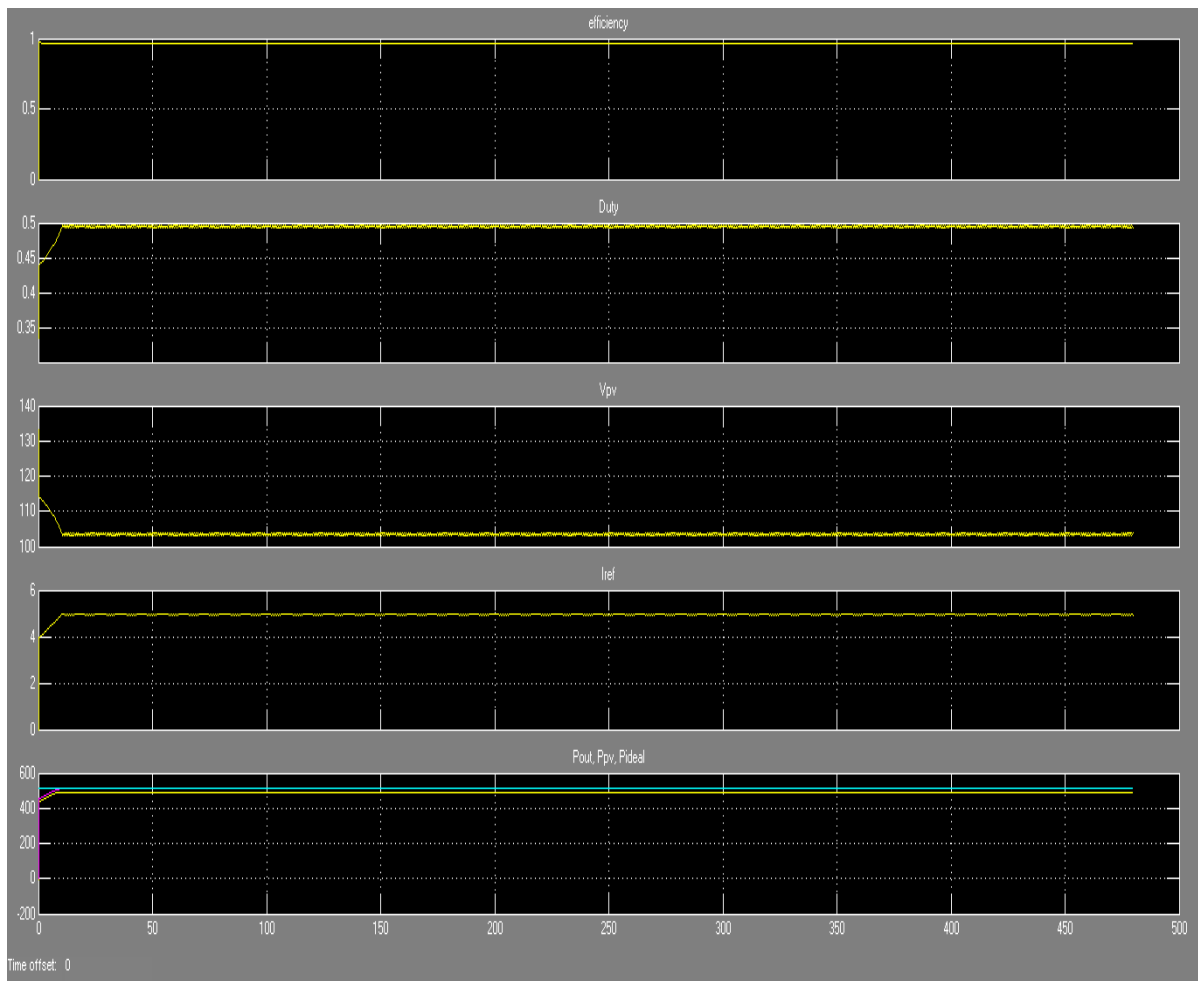
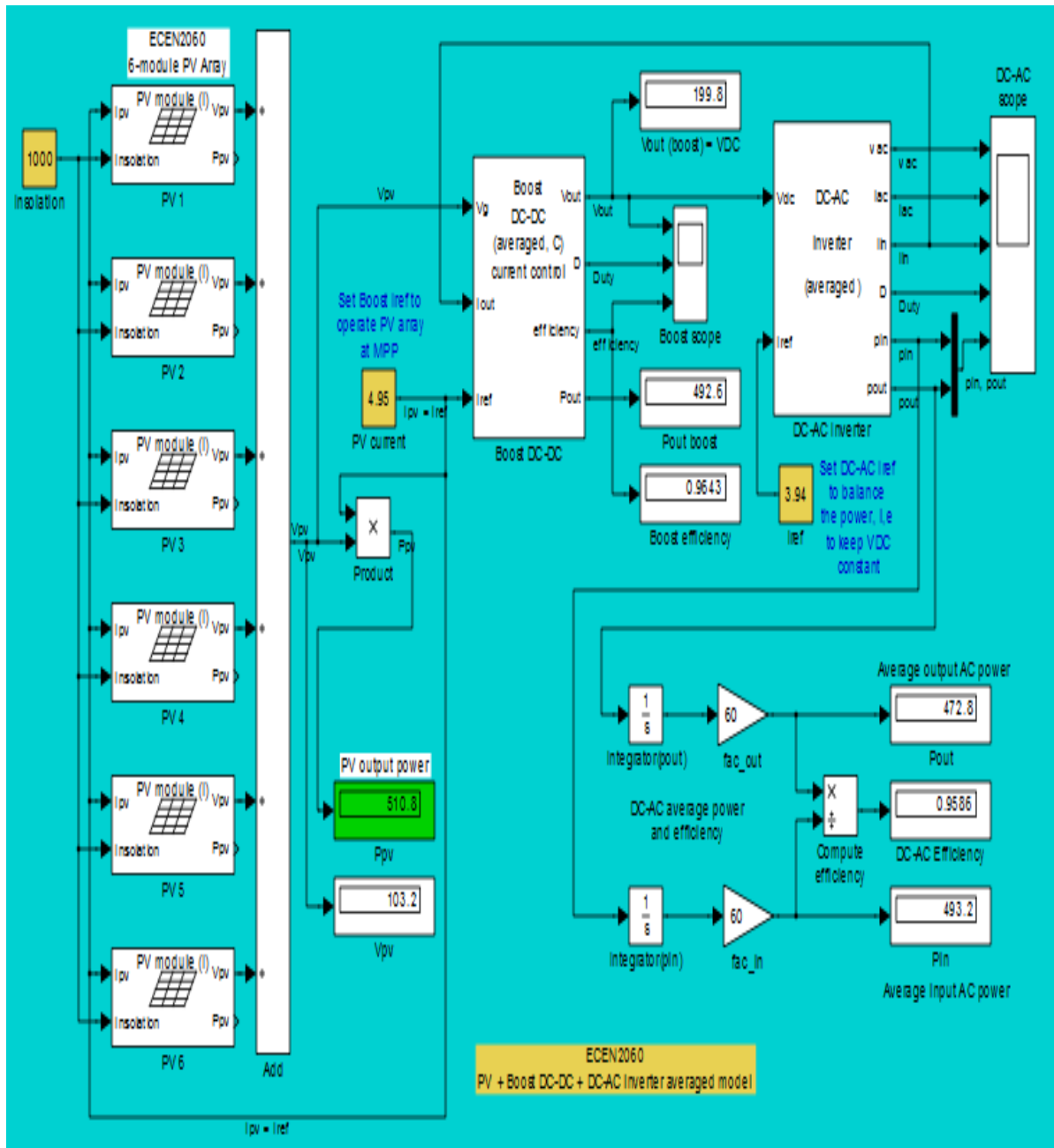


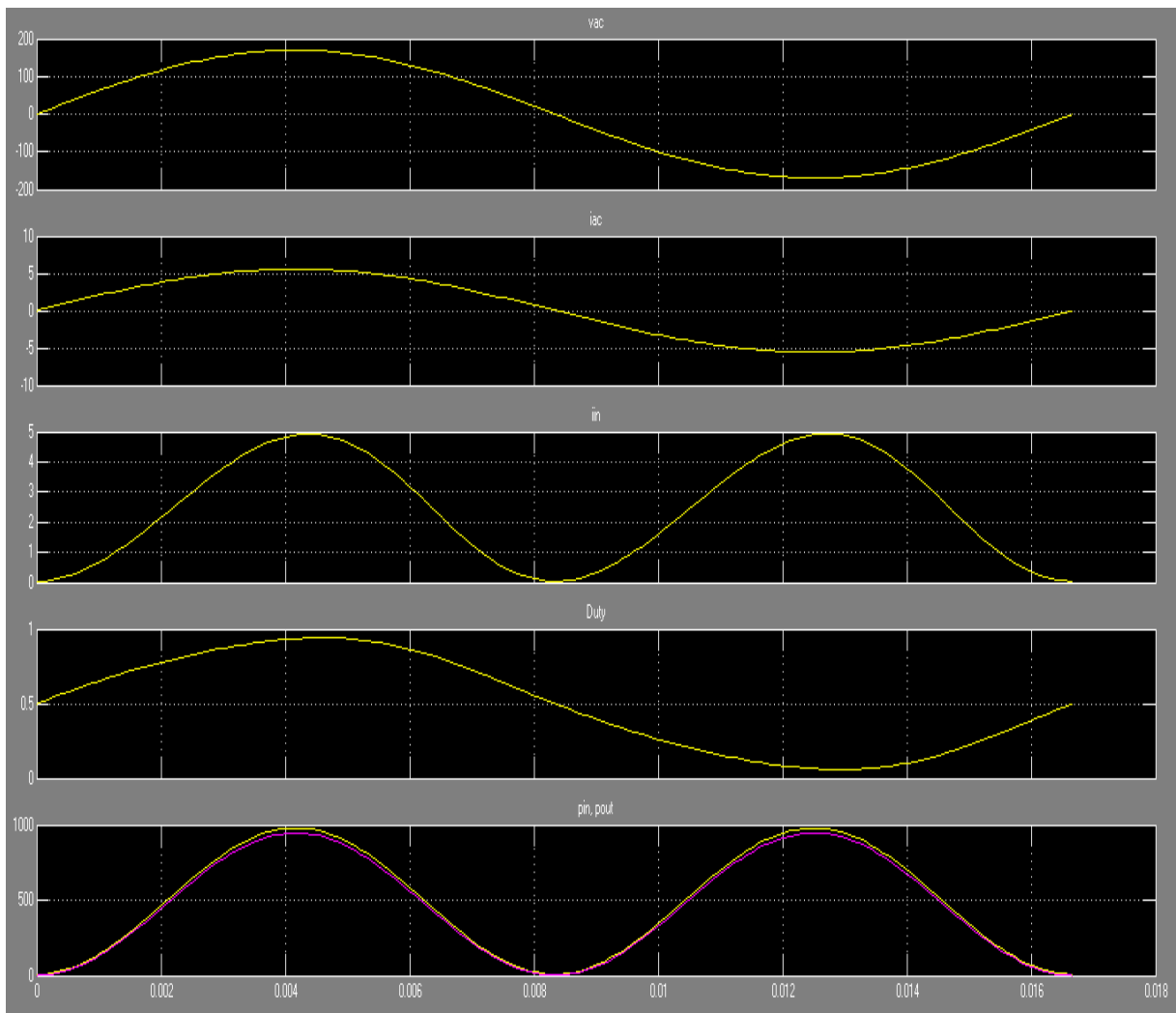
Fig.2.17.Simulation model: PV boost DC/DC charge continues.



$V_{pv}$	$I_{pv}$	$E_{pv}$	$P_{pv}$	$E_{edial}$	$E_{out}$	Effacité
103,4 V	4,94 A	4,081 kWh	510,8 W	4,087 kWh	3,936 kwh	0,9644

Fig.2.18.Les résultats de simulation pour une charge continue.





		DC/DC			DC/AC		
$V_{pv}$	$P_{pv}$	$V_{out}$	$P_{out}$	efficacité	$P_{in}$	$P_{out}$	efficacité
103,2 V	510,8 W	199.8 V	492,6 W	0,9643	493,2 W	472,8W	0,9586

**Fig.2.19.**Simulation model: PV boost DC-AC charge alternative.

### **II-6. Conclusions :**

Dans ce chapitre, nous avons mis en œuvre un système photovoltaïque autonome avec stockage. Les modèles des différents composants ont été choisis afin de tenir compte des interactions pouvant subvenir à différents niveaux :

- le modèle des panneaux PV est précis et tient compte de la variation d'ensoleillement,
- les convertisseurs, grâce à leur commande robuste permettent de faire face aux forts appels de courant, garantissant ainsi la sûreté de fonctionnement du système,
- la gestion du flux d'énergie est correctement assurée par le module de supervision.

Dans le chapitre suivant, nous proposons d'améliorer le stockage en y ajoutant des composants de puissance qui auront pour rôle de faire face aux pics de puissance et ainsi permettront à long terme d'augmenter la durée de vie des batteries.



## **CHAPITRE III:**

# **STOCKAGE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE PHOTOVOLTAÏQUE**

**III-1. Introduction :**

Dans le cas du photovoltaïque, suivant la proximité d'un réseau électrique ou non et afin d'assurer la continuité de la fourniture d'énergie électrique, il sera parfois nécessaire d'ajouter un système de stockage.

Dans ce chapitre, avant de détailler la production de l'énergie solaire photovoltaïque, il nous semble opportun de décrire le principe photovoltaïque permettant de transformer la lumière en électricité ainsi que les différents paramètres pouvant influencer son fonctionnement. Nous procéderons aussi à une étude approfondie des différents moyens de stockage d'énergie

**III-2. Synthèse des différents dispositifs de stockage :****III-2-1. Caractéristique d'un module photovoltaïque :**

L'un des principaux inconvénients de l'énergie solaire est son caractère intermittent. Pour une utilisation permanente, il est donc nécessaire de stocker une partie de l'énergie produite. Pour ce faire il existe plusieurs méthodes de stockage : sous forme d'eau, d'hydrogène, dans un volant d'inertie, dans une batterie électrochimique (plomb, lithium) ou un super condensateur. Leur choix se fait suivant des caractéristiques fondamentales qui sont :

- **Wstoc** : la **capacité énergétique** en Wh, qui est une caractéristique très importante lors du dimensionnement. L'énergie exploitable dépend néanmoins du rendement de charge ou décharge et varie donc avec le temps de transfert. En charge ou décharge très rapide, le rendement se dégrade et l'énergie extractible peut être très inférieure à la capacité énergétique de l'élément de stockage. A l'opposé, en régime lent, c'est l'autodécharge qui va pénaliser le bilan. Enfin, les accumulateurs ne peuvent pas toujours être déchargés complètement. L'énergie exploitable est donc inférieure à l'énergie totale stockée. Souvent, la capacité énergétique est définie sur la base d'une **énergie** totale stockée supérieure à celle réellement **exploitable** notée **Wutil**.

- **Pmax** : la **puissance maximale** de charge ou de décharge parfois différentes. En effet si l'on prend l'exemple des accumulateurs électrochimiques, suivant le taux de charge (valeur du courant), la capacité en ampère-heure chargée ne sera pas la même. Une batterie de capacité nominale C chargée complètement à un taux C20 (courant de charge  $I=C/20$ ) ne pourra fournir que la moitié de cette capacité si l'on la décharge à un taux égal à C1 ( $I=C/1$ ). La puissance disponible est donc liée à la constante de temps :

$$\tau \left( \tau = \frac{W_{util}}{P_{max}} \right)$$

-  $\eta$  : le **rendement** est le rapport de l'énergie restituée sur l'énergie emmagasinée. Sa définition est souvent simpliste car elle n'est fournie que pour un seul point de fonctionnement. Or, de façon caricaturale, il y a des « pertes à vide » ou d'autodécharge et des « pertes en charge ». Le rendement doit donc être défini sur un ou plusieurs cycles réalistes en rapport avec l'application. Ainsi un système optimisé pour une faible « constante de temps » aura un meilleur rendement lors de sollicitations rapides.

-  $N_{cycl}$  : le nombre maximal de cycles de charge/décharge ou cyclabilité. Tout dispositif de stockage subit une fatigue ou usure lors des cycles. Cela constitue généralement la première cause de vieillissement devant la dégradation thermique classique. Les processus de fatigue sont souvent complexes et la cyclabilité n'est pas toujours bien définie. Dans tous les cas, elle est fortement liée à l'amplitude des cycles et/ou à l'état de charge moyen. Mais comme les cycles sont souvent très variables, la quantification de  $N_{cycl}$  est délicate. Les valeurs fournies constituent des ordres de grandeurs.

- Les **coûts** d'investissement (c'est la part la plus marquante pour l'acheteur) et de fonctionnement (maintenance, énergie perdue lors des cycles, vieillissement) : les systèmes les moins coûteux à l'investissement sont généralement ceux qui se dégradent le plus vite en cyclage et dont le rendement est le plus mauvais. Pour minimiser le coût, il est indispensable d'effectuer une analyse sur la durée de vie escomptée du système complet incluant le dispositif de stockage. Enfin, dans une démarche de développement durable, le coût global sur le cycle de vie, incluant les dépenses de matières premières, d'énergie et autres coûts environnementaux de la fabrication au recyclage, doit être considéré. Le coût d'investissement est généralement spécifié en €/kWh pour les accumulateurs d'énergie et en €/kW pour ceux plutôt dimensionnés en puissance, à faible constante de temps. Mais en réalité, il serait logique de répartir le coût entre ceux de l'énergie stockée exploitable  $W_{util}$  et de la capacité en puissance maximale.

- Autres caractéristiques : l'**énergie massique** (particulièrement importante dans les applications embarquées), elle revêt une moindre importance dans les applications stationnaires, l'**énergie volumique**, la **sécurité** (explosion, rejets...), etc...

**III-2-2. Moyens de stockage, comparaison :**

Les dispositifs de stockage peuvent être classés en deux catégories : directe et indirecte.

- Le condensateur et l'inductance sont réputés être les seuls moyens de stockage direct de l'électricité, mais dans leurs formes conventionnelles ne sont pas utilisables pour faire du stockage d'énergie aux échelles de temps qui nous intéressent ici (quelques secondes à quelques mois). Si l'on reste sur cette classification discutable de stockage, direct et indirect, les systèmes directs, utilisables dans nos applications, sont les **super-condensateurs** (SMES : Superconductor Magnetic Energy Storage). Les premiers sont des condensateurs à très haute énergie volumique ou massique (10 Wh/kg et jusqu'à plus de 50 Wh/kg avec les toutes dernières technologies), avec des puissances massiques très élevées (quelques kW/kg) soit des constantes de temps de l'ordre d'une centaine de secondes. Leurs performances les destinent plutôt aux applications embarquées.

Quant aux SMES, il s'agit de bobines, sans circuit ferromagnétique, à conducteurs supraconducteurs fonctionnant à des températures cryogéniques, en général l'hélium liquide (4,2 °K ou moins) pour les supra basse température (alliages NbTi ou Nb<sub>3</sub>Sn) ou l'azote liquide (15 à 30 °K) pour les supra « haute température » (au Bismuth : BSCCO ou à l'Yttrium : YBaCuO). La bobine se présente comme une source de courant continu. Ce courant varie en fonction de l'état de charge et doit être converti pour être exploitable, en une tension continue ou alternative. Comme les super condensateurs, les SMES présentent une faible constante de temps et sont adaptés au stockage d'une puissance importante.

Les autres moyens de stockage, considérés comme indirects, sont :

- les **accumulateurs électrochimiques**. Lorsque l'on parle de stockage d'électricité, on pense immédiatement aux « batteries » électrochimiques qui constituent ainsi les références en la matière. Les technologies et variantes sont nombreuses (Plomb- Acide, Nickel-Cadmium, Nickel-Métal-Hydrures, Lithium, Sodium-Soufre, Zinc-Air, etc...) et leurs principales qualités sont l'énergie massique (Lithium jusqu'à 150 Wh/kg) et la maturité technologique, du moins pour des capacités encore limitées à quelques kWh. Leur inconvénient majeur réside dans leur relativement faible durée de vie en cyclage de grande amplitude (qq 100 à qq 1000). Souvent, elles sont destinées à des applications embarquées ou portables mais également pour des fonctions de secours en situation couplée au réseau, avec des quantités d'énergie stockée relativement faibles (quelques Wh à quelques 10 kWh). Cependant, les technologies plomb, NiCd et NaS ont été utilisées dans plusieurs projets de stockage à grande échelle.

- les accumulateurs à **volants d'inertie** (FES : Flywheel Energy Storage) comprennent un volant d'inertie massif ou composite (plus rapide, énergie massique supérieure) associé à un moteur-générateur et à des paliers spéciaux (souvent magnétiques), le tout dans une enceinte de confinement sous très basse pression afin de minimiser les pertes d'autodécharge. On peut ainsi atteindre des taux d'autodécharge de quelques % par heure. Ils offrent une très grande capacité de cyclage (qq 10 000 à qq 100 000 cycles). De façon simpliste, le volant est dimensionné en énergie et le moteur-générateur en puissance ; énergie et puissance sont ainsi facilement « découplés ». On considère habituellement que les accumulateurs inertiels se rangent, aux côtés des super condensateurs et des SMES, dans la catégorie des systèmes à faible constante de temps. C'est d'ailleurs dans ce domaine qu'ils ont trouvé leurs premières applications commerciales (UPS Piller et Caterpillar), mais ils peuvent également permettre de réaliser des systèmes plus lents (constante de temps de l'ordre de l'heure) et étendre leur champ d'application (Beacon Power).

- les systèmes à **air comprimé en bouteilles**, un compresseur électrique permet de mettre de l'air sous haute pression (200 bars ou plus) dans des bouteilles. La compression ou détente s'accompagne de pertes énergétiques (éventuellement valorisables dans certaines applications) et le rendement électrique est souvent médiocre. Mais une amélioration considérable peut être apportée par une interface liquide (huile ou eau). Le moteur hydraulique comprime le liquide qui comprime à son tour l'air en quasi isotherme avec un meilleur rendement global.

- les systèmes **électrolyseur-hydrogène-pile à combustible** (ou à PAC réversible), outre un coût d'investissement encore prohibitif, leur rendement global est très faible et leur durée de vie insuffisante dans le contexte des applications couplées au réseau électrique. La production d'hydrogène pourrait être avantageuse en présence de réseaux d'hydrogène. Elle permettrait de convertir des surplus d'électricité et de les injecter dans ces réseaux pour une utilisation directe (transports par exemple). Pour le stockage à plus grande échelle, on peut citer les solutions suivantes:

- les systèmes **hydrauliques gravitaires** centrales de pompage-turbinage (pumped hydro). La contrainte majeure est liée à la nécessité de sites au relief adapté. Notons que 100 m<sup>3</sup> d'eau stockées en haut d'un immeuble de 20 m ne représenteraient « que » 20 MJ ou 5,5 kWh.

- le stockage d'**air comprimé en caverne** (CAES Compressed Air Energy Storage) représente une technologie déjà relativement mature avec plusieurs réalisations de grande puissance. La construction de systèmes CAES nécessite de disposer d'une géologie favorable

permettant de disposer de grandes cavités (anciennes mines de sel par exemple). La définition du rendement est ici particulière car on brûle du gaz naturel pour réchauffer l'air dans une chambre de combustion avant de le détendre dans la turbine. Pour restituer 1 kWh au réseau, il faut utiliser 0,75 kWh d'électricité durant la phase de pompage et brûler 1,22 kWh de gaz naturel durant le déstockage.

- les **batteries à circulation** (flow batteries) permettent de contourner la limitation des accumulateurs électrochimiques classiques dans lesquels les réactions électrochimiques créent des composés solides qui sont stockés directement sur les électrodes ou ils se sont formés. La masse qu'il est possible d'accumuler localement est forcément limitée, ce qui fixe une limite à la capacité. Dans les batteries dites à circulation d'électrolyte, les composés chimiques responsables du stockage de l'énergie sont liquides et restent en solution dans l'électrolyte. Trois technologies sont en développement avec des électrolytes à base de ZnBr (Zinc-brome),

NaBr (Sodium-brome) et VBr (Vanadium-brome). L'électrolyte est pompé vers des réservoirs externes dont le volume représente l'énergie stockée. Des systèmes de capacité élevée (qq 100 kWh à qq 10 MWh) sont en expérimentation sur sites.

Le tableau de la **Tab.3.1** résume les principales caractéristiques de ces moyens de stockage.

Technologie	Inductif supra conducteur	Super-condensater	Électro-chimique	Volant Inertie	Air comprimé embouteille	Hydrogène PAC réversible
Forme d'énergie	magnétique	Electrostatique	Chimique	Mécanique	mécanique	Chimique
Densité d'énergie (Accumulateur seul)	1 à 5 Wh/kg	5 à 10 Wh/kg	20 à 120 Wh/kg	1 à 5 Wh/kg	8 Wh/kg (200 bars)	300 à 600 Wh/kg (200 à 350 bars) hors PAC
Capacité réalisable ou réalisée	qq kWh	qq kWh	qq kWh à qq MWh	qq kWh à qq 10 kWh	qq kWh à qq 10 kWh	NA
Constant de temps	qq s à 1 mn	qq s à qq mn	qq 10 mn (NiCd) à qq 10 heures (pb)	qq mn à 1 h	1 h à qq jours (peu d'autodécharge)	1 h à qq jours (peu d'autodécharge)
Cyclabilité	qq 10 000 à qq 100 000 fatigues mécaniques	qq 10 000 à qq 100 000	qq 100 à qq 1000 dégradations chimiques	qq 10 000 à qq 100 000 fatigues mécaniques	qq 1000 à qq 10 000 fatigues mécaniques	??
Rendement électrique	>0,9	0,8 à >0,9 selon régime	0,7 à 0,8 selon techno et régime	0,8 à >0,9 selon régime	0,3 à 0,5 selon régime	0,3 à 0,5
Connaissance de l'état de charge	Aisée (courant)	Aisée (tension)	Difficile paramètres variables	Aisée (vitesse)	Aisée (pression)	Aisée (remplissage H2)
Coût énergie €/kWh (1)	500 à 72 000	50 000 à 150 000 (dimensionnement en puissance)	Pb-acide : 50 à 200 Lithium : 700 à 1000	150 à 2000 (massif) 25000 (composite)	?	15
Coût puissance €/kW (1)	300	300	200 à 1500	300 à 350	?	6000
remarques	Cryogénie	Grande cyclabilité	Technologie mature	Coût global compétitif sur la durée de vie	Rendement faible	Intéressant si content de réseau d'hydrogène

**Tab.3.1.** Comparaison de différentes technologies de stockage.

Dans les systèmes photovoltaïques, le moyen de stockage utilisé couramment est le stockage électrochimique. De plus, pour un site isolé, il devra respecter certaines contraintes notamment un bon rapport coût/performance, une grande fiabilité, une bonne sécurité... Dans ce domaine, les batteries au plomb-acide sont les plus répandues car elles offrent le meilleur compromis en termes de coût / performance / entretien.

Nous présenterons une étude sur le fonctionnement de ces batteries et les précautions à prendre pour leur bon fonctionnement. Le stockage électrique à travers

les super Condensateurs présente aussi un intérêt du fait de leur utilisation en appoint lors d'un fort appel de puissance, une étude leur sera aussi consacrée par la suite.

### **III-3. Stockage de l'énergie électrique photovoltaïque :**

#### **III-3-1. Principe du stockage hybride dans les systèmes électriques :**

La notion de stockage hybride a pris de l'ampleur avec l'arrivée des voitures électriques dans le secteur de l'automobile. En effet, les variations brutales d'énergie (puissances crêtes importantes par rapport à la puissance moyenne) conduisent à des pertes accrues et à des surdimensionnements coûteux des systèmes de conversion et au final à un mauvais bilan énergétique. Un dispositif de stockage intermédiaire permet de mieux gérer l'énergie et de réduire les effets néfastes des pics de consommation ou de production (cas d'un tramway électrique ou d'un métro dont les pointes de consommation (démarrages et freinages de récupération) peuvent être dix fois supérieures à la puissance moyenne). L'adjonction de moyens de stockage d'électricité adaptés à des transferts rapides permet d'améliorer le bilan énergétique global, en réduisant les pertes notamment dans la ligne électrique de transport. Toujours dans le domaine des transports, le moteur thermique (à combustion interne, essence ou diesel) d'une automobile est généralement très surdimensionné en puissance maximale pour permettre de satisfaire des performances d'accélération, de franchissement de côtes, etc. Dans les usages normaux (vitesse constante et modérée), le moteur est très sous-utilisé et travaille loin de sa puissance maximale, avec un rendement médiocre. À cette puissance, un moteur de moindre puissance nominale aura un meilleur rendement et consommera donc moins de carburant. Le surdimensionnement conduit finalement à un gaspillage énergétique. Il y a deux solutions à ce problème : accepter une puissance plus faible et des performances moindres, en accélération

Notamment, ou hybrider la chaîne de traction en associant au moteur thermique un moteur électrique (réversible) avec accumulateur électrique. La partie électrique vient alors

assister le moteur thermique durant les demandes de puissance importante et permet également de récupérer l'énergie de freinage, ce qui n'est pas le cas avec le moteur thermique non réversible. C'est le principe de base des automobiles hybrides, dont la Toyota Prius est la plus aboutie et la plus connue des versions commercialisées à grande échelle. La consommation de carburant peut être réduite de façon significative, surtout en cycle urbain. En transposant ce principe d'hybridation au cas du photovoltaïque, le confort d'utilisation se voit ainsi augmenter. En effet, la possibilité de disposer instantanément d'une puissance élevée permettra un changement des habitudes dans l'utilisation de l'énergie provenant d'un système photovoltaïque en site isolé. Contrairement à un système conventionnel où le matériel utilisé se limite à des appareils de très basse consommation, on peut envisager l'introduction d'équipements gourmands en électricité lors des phases de démarrage (par ex. une machine à laver). Le choix des composants de stockage devra se faire suivant un cahier des charges précis. Différentes études décrivent la pertinence de la combinaison de plusieurs sources d'énergie pour faire une source de stockage hybride efficace. L'investissement et les frais d'exploitation définissent la technologie d'un système de stockage. La meilleure combinaison possible est celle des batteries et des super capacités pour satisfaire en même temps aux besoins d'énergie et de puissance. Pour faire face aux crêtes de puissance, le dispositif de stockage doit avoir une dynamique rapide, une puissance spécifique élevée et tolérer des décharges profondes. En plus de ces caractéristiques, les super capacités ont un nombre de cycle élevé comparé aux autres technologies de stockage. En associant super capacités et batteries, on devra être en mesure d'optimiser le dimensionnement du système de stockage, augmenter sa durée de vie avec en prime une bonne dynamique.

### **III-3-2. Batteries au plomb : fonctionnement et performances :**

#### **III-3-2-1. Fonctionnement d'un accumulateur au plomb :**

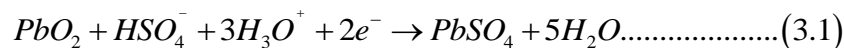
Un accumulateur est un système électrochimique capable de restituer sous forme électrique l'énergie chimique stockée. En plus, les réactions internes sont réversibles. Ce système se compose de deux électrodes (positive et négative) et d'un électrolyte. L'électrode positive est en dioxyde de plomb ( $\text{PbO}_2$ ) et la négative en plomb. L'électrolyte est une solution d'acide sulfurique ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) qui permet le flux d'ions entre les deux électrodes et crée un courant. La différence de potentiel entre les deux électrodes est de 2V.



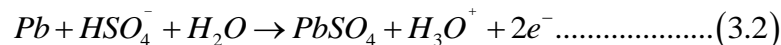
**Fig.3.1.** Batterie au plomb pour stockage de l'énergie pour application photovoltaïque .

La paroi plane séparant les deux électrodes est fait d'un matériau poreux qui, tout en permettant le passage d'ions, empêche les deux électrodes de se toucher. L'ensemble électrodes-électrolyte est le lieu d'une réaction d'oxydoréduction dont voici les équations :

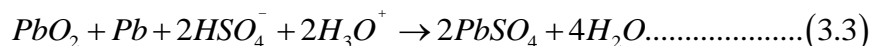
Electrode positive (anode):



Electrode négative (cathode) :



Ce qui nous donne globalement :



Que l'on peut condenser en :



Les décharges trop profondes peuvent conduire à une perte irréversible de capacité. Trois causes possibles sont à l'origine de ce phénomène :

- transformation irréversible d'une partie de la matière active de l'électrode positive (PbO<sub>2</sub>) en cristaux de sulfate de plomb,
- gonflement progressif et perte de cohésion de la matière active de l'électrode positive,
- passivation électronique du collecteur de courant de l'électrode positive.

Typiquement, la tension de cellule évolue de la manière suivante :

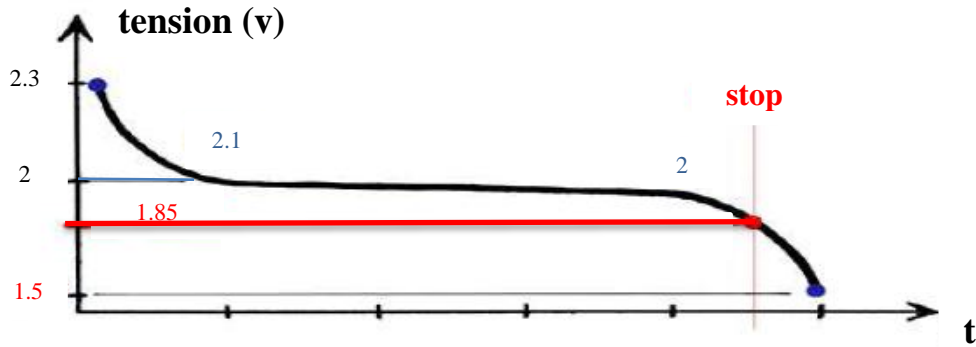
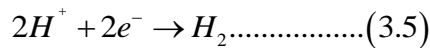


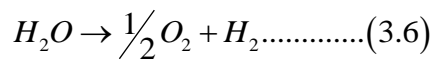
Fig. 3.2. Evolution de la tension d'une cellule de batterie au plomb.

Si la charge se poursuit trop longtemps, la tension peut atteindre 2,4 V, valeur de seuil à partir de laquelle on assiste à la décomposition de l'eau (électrolyse) en dioxygène O<sub>2</sub> gazeux à l'électrode positive et en dihydrogène H<sub>2</sub> gazeux à l'électrode négative.

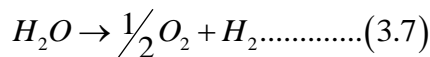
Ce phénomène dit de dégazage est caractérisé par les réactions suivantes aux électrodes :  
à l'anode :



à la cathode :



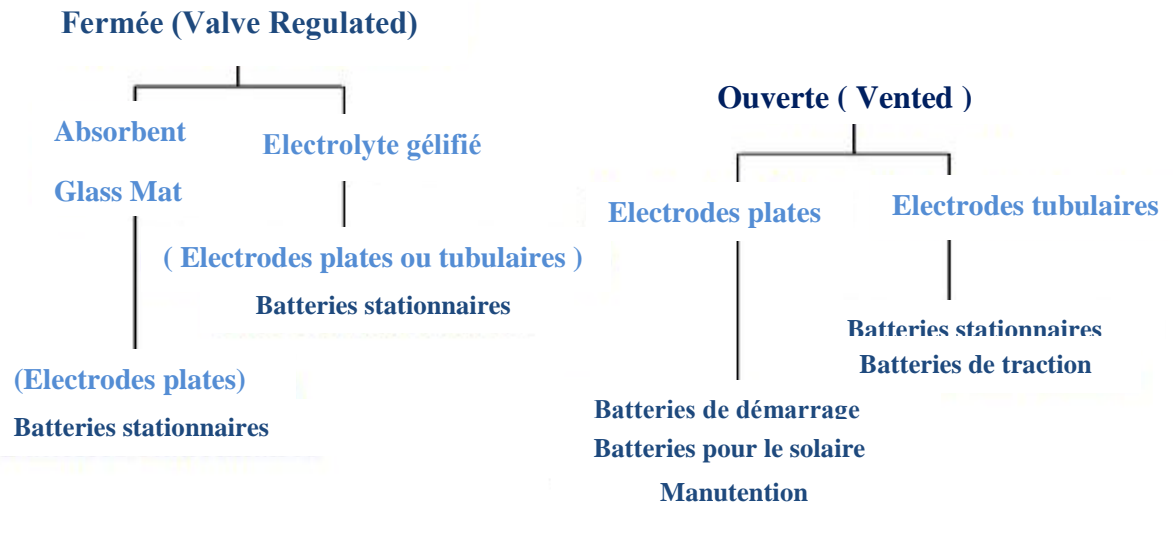
Réaction globale :



La densité théorique d'énergie de ce couple électrochimique est de 170 Wh/kg. Cependant, le sulfate de plomb produit par les réactions aux deux électrodes est insoluble et non conducteur. Son accumulation sur les électrodes, et dans une moindre mesure dans l'électrolyte, limite par conséquent l'énergie qui peut être extraite de la batterie. De plus, les concentrations et les quantités de masses actives sont inférieures à celles conduisant à cette valeur. La densité pratique d'énergie est proche de 40 Wh/kg, soit quatre fois moins que le maximum théorique.

### III-3-2-2. Les différents types de batteries au plomb :

Les accumulateurs au plomb sont divisés en deux grandes familles : les batteries ouvertes (Vented Batteries) et les batteries scellées (Valve Regulated Lead Acid Batteries).



**Fig.3.3.** Les différents types de batteries.

- Batteries « classiques » ou ouvertes.

Pour ce type de batteries, la cellule n'est pas fermée. La quantité d'électrolyte (compose typiquement de 65 % d'eau et 35 % d'acide sulfurique) peut diminuer en raison des occurrences successives du phénomène de dégazage ainsi que de l'évaporation naturelle. La batterie nécessite donc une maintenance au cours de laquelle le niveau de l'électrolyte doit être réajusté avec de l'eau de-ionisée pour le bon fonctionnement de l'accumulateur.

Enfin, ces batteries doivent se trouver dans un emplacement suffisamment ventilé car le dégagement gazeux qu'elles peuvent produire devient explosif lorsque la proportion d'hydrogène dans l'air atteint 4 % en volume.

- Batteries VRLA (Valve Regulated Lead-Acid).

Ces batteries sont aussi appelées batteries « sans entretien ». Ici, la cellule est fermée.

L'électrolyte y est immobilisé sous forme de gel (ajout de silice à haute surface spécifique),

Ou encore retenu dans un séparateur en fibre de verre à haut pouvoir capillaire (AGM, Absorbent Glass Mat). Les gaz produits durant le dégazage restent donc « prisonniers »

dans le gel et sont recombines durant la décharge. La consommation d'eau et l'émission de gaz sont donc extrêmement faibles.

Il existe deux types principaux de technologies concernant l'électrode positive  $PbO_2$  : Celle-ci peut être soit une plaque plane, soit tubulaire. Les plaques planes sont constituées de grilles formées d'un alliage de plomb auquel on ajoute 5% d'antimoine, le tout enrobe dans de la matière active. Cette disposition permet des puissances supérieures grâce à l'augmentation des surfaces d'échange électrode/électrolyte. Par contre, pour les plaques tubulaires, la matière active est emprisonnée dans des gaines poreuses. La transmission du courant est alors assurée par des épines de plomb disposées dans ces gaines. Cette technologie permet d'augmenter la durée de vie, spécialement en cyclage profond, mais a un prix de revient plus important

### III-3-2-3. Performances techniques :

Le tableau suivant résume les principales données techniques des accumulateurs au plomb.

<b>Température de fonctionnement</b>	-20 à + 50°C
<b>Énergie</b>	25/45 Wh/dm <sup>3</sup>
<b>Nombre de cycles profonds</b>	300/1500
<b>Puissance massique</b>	80/150 W/kg
<b>Rendement<sup>(a)</sup></b>	-énergétique : de 60 à 95 % -faradique : de 65 à 100 %
<b>Autodécharge</b>	2 à 10 % par mois à 25°C
<b>Maintenance</b>	-surveiller le niveau d'eau pour les batteries (ouverts) non étanches tous les 2 mois -sulfatation de l'électrolyte en cas de stockage prolongé »» brassage
<b>Impact environnemental</b>	Le plomb est toxique »» (≅ 100%) par réduction des oxydes de plomb et tri pneumatique ou hydraulique des plastique (polypropylène)
<b>Sécurité</b>	-acide sulfurique : corrosif -problèmes de surpression de l'hydrogène en cas de surcharge

**Tab.3.2.** Principales données techniques de la batterie au plomb.

**(a) Rendement :**

- i. énergétique = énergie effectivement disponible en décharge / énergie injectée dans la batterie au cours de la charge
- ii. faradique = capacité en décharge / capacité en charge.

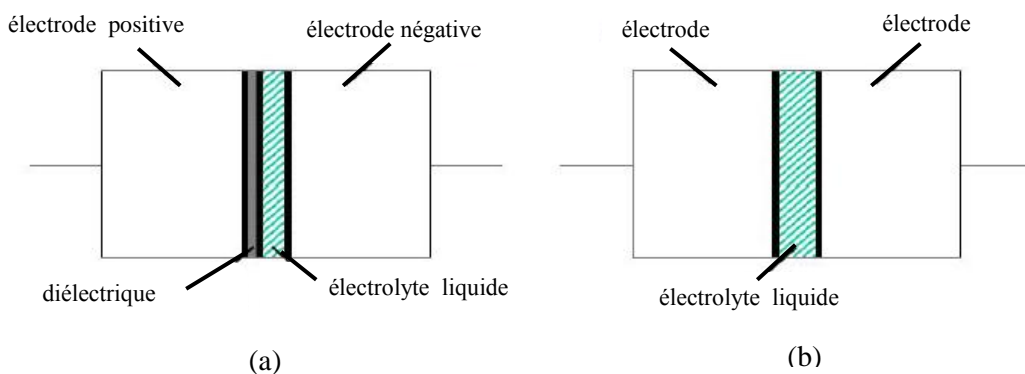
**III-3-2-4. Contexte industriel et économique :**

La marche de la batterie au plomb est un enjeu industriel important. Il concerne les batteries de démarrage (SLI, Starting Lighting Ignition) ainsi que la plupart des batteries stationnaires. Les industriels sont par conséquent très nombreux dans le monde entier : Panasonic, Hawke ou GP Batteries, CEAC, Fulmen ou Varta. La marche est donc très concurrentielle. Le coût des accumulateurs au plomb varie entre 50 et 150 Euros/kWh, qui sont un des plus faibles parmi les systèmes de stockage. C'est l'une des principales raisons pour lesquelles la batterie au plomb est très utilisée. Ce coût est quasiment incompressible, du fait de la très grande maturité de la technologie.

Le taux de recyclage de la batterie au plomb atteint pratiquement 100 % ce qui participe aux avantages de ce type d'accumulateur malgré la haute toxicité de son principal matériau, le plomb.

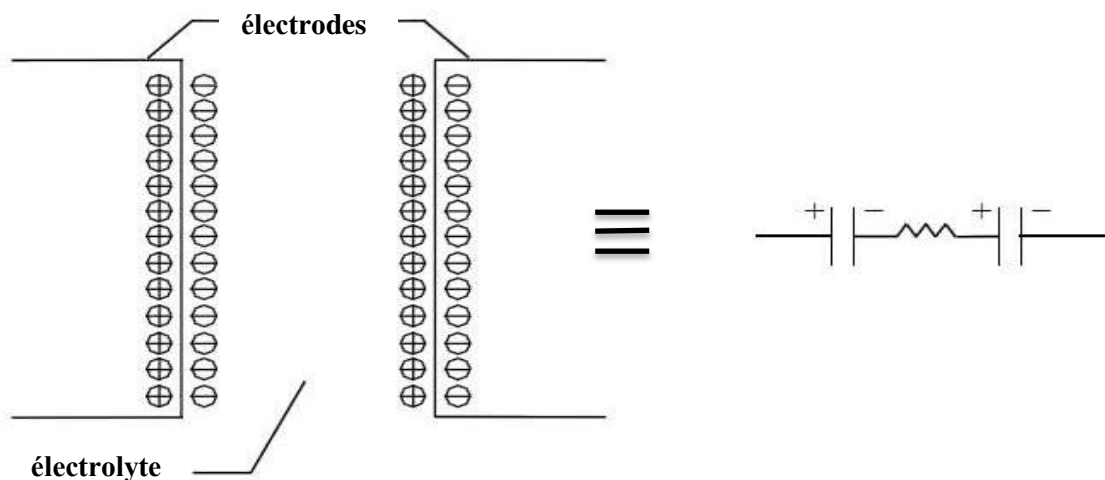
**III-4. Stockage électrique : les super capacités :****III-4-1. Principe :**

Avec des capacités atteignant des milliers de farads, les super capacités ont révolutionné les applications. La différence fondamentale avec la technologie électrolytique des condensateurs réside dans l'absence apparente de couche diélectrique

**Fig. 3.4.****Fig. 3.4.** Condensateur électrolytique (a) et super capacité (b).

En effet, le principe de base des super capacités repose sur les propriétés capacitives de l'interface entre conducteur électronique solide et conducteur ionique liquide. Le stockage d'énergie s'effectue par distribution des ions de l'électrolyte au voisinage de la surface de chaque électrode sous l'influence de la tension électrostatique appliquée. Il se crée ainsi aux interfaces une zone de charge d'espace appelée couche double électrique, d'épaisseur limitée à quelques nanomètres. La fonction diélectrique est assurée quant à elle par les molécules du solvant de l'électrolyte.

Une super capacité peut être schématisée par deux capacités représentatives des charges stockées, connectées en séries par le biais d'une résistance associée à l'électrolyte **Fig.3.5**.



**Fig.3.5.** Principe de développement des super capacités.

Les matériaux d'électrodes poreux a très grande surface spécifique comme le charbon ( $>1000\text{m}^2/\text{g}$ ) permettent d'accroître l'énergie spécifique et la capacité volumique des super capacités sans accroître le volume total.

Le principe de stockage d'énergie électrostatique par couche double électrique confère aux super capacités deux caractéristiques importantes : leur réversibilité en tension et leur faible tenue en tension (quelques volts), cette dernière caractéristique rend inévitable leur mise en série pour différentes applications.

#### III-4-2. Performances :

L'intérêt majeur des super capacités réside dans l'absence de maintenance par rapport à des solutions à base d'accumulateurs, conséquence de leur grande durée de vie. Notons de plus qu'elles permettent une durée de sauvegarde dix fois plus longue que celle obtenue avec un condensateur.

Les super capacités ont connu une évolution spectaculaire de leur capacité vers la fin des années 90. A cette époque, Asahi Glass annonçait des composants atteignant 5Wh/kg et Saft, 7Wh/kg. Les tableaux suivants résument les caractéristiques des composants présents sur le marché.

<i>Constructeur</i>	<i>Energie spécifique (Wh.kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Puissance spécifique (kW.kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Tension par cellule élémentaire(V)</i>
<b>Maxwell (USA)</b>	3 à 4	5 à 9	2,3 (3max.)
<b>Polystor (Usa)</b>	0,7	>10	2,45 max.
<b>Redox (USA)</b>	6	3	3 max.
<b>Panasonic (Japon)</b>	3	3,5	2,3 (3max.)
<b>Asahi Glass (Japon)</b>	3 à 5	1,5	2,5 (3 max.)
<b>Kanebo / JSB (Japon)</b>	6 à 7	2	2,5
<b>Salf (France)</b>	6,8	7,8	3 max.
<b>Cap XX (Australie)</b>	6	2	2,7 (3 max.)
<b>Montena (Suisse)</b>	3	3	2,3
<b>Superfarad (Suède)</b>	4		3 max.

**Tab.3.3.** caractéristiques des principaux composants carbonés à électrolyte organique.

<i>Constructeur</i>	<i>Energie spécifique (Wh.kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Puissance spécifique (kW.kg<sup>-1</sup>)</i>	<i>Tension par cellule élémentaire(V)</i>
<b>EVANS</b>	0,7		1
<b>NEC/Tokin(Japon)</b>	1,3	1,6	1 max.
<b>Econd (Russie)</b>	0,2	2,5	1 max.
<b>TESMA (Russie)</b>	10	0,8	0,9 à 1,8
<b>Elit (Russie)</b>	4	>2	0,8 à 1,7
<b>Alupower (Canada)</b>	0,5		1,2 max.

**Tab.3.4.** Caractéristiques des principaux composants carbonés a électrolyte aqueux.

Aujourd'hui, les super capacités sont proposés sous formes de modules de puissance ; ce sont des composants élémentaires mis en série et pouvant être directement intègres dans des applications. Maxwell propose par exemple dans sa gamme BOOTSCAP des modules de 16V, 48V, 75V, ou encore 125V.

### III-4-3. Applications :

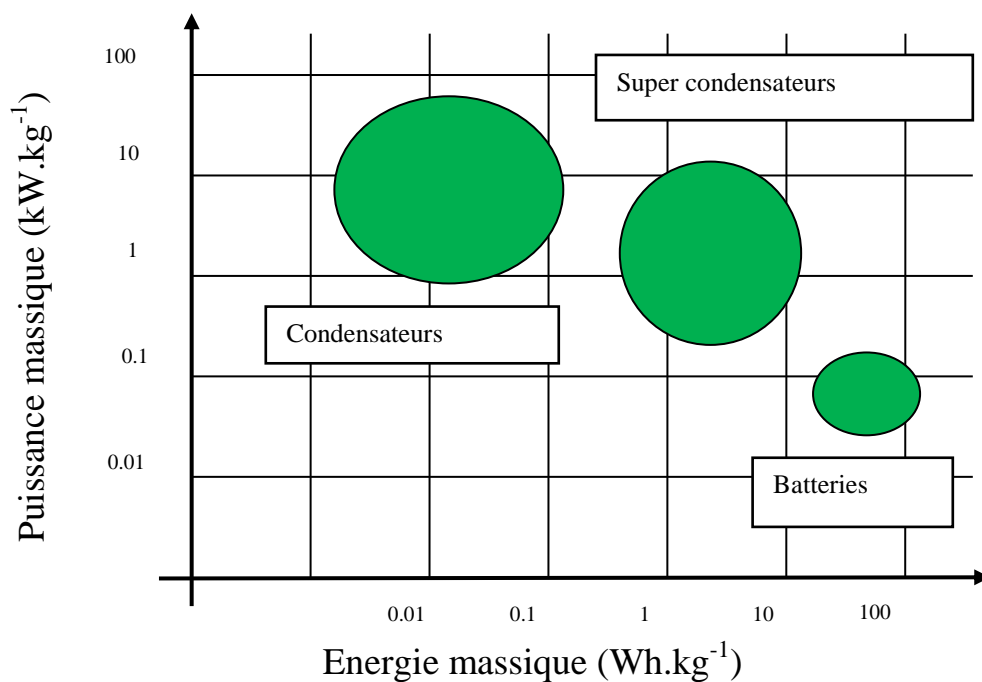
De plus en plus de systèmes de stockage utilisent les super capacités soit pour remplacer soit pour accompagner les batteries électrochimiques afin d'assurer la fonction puissance qui fait défaut à ces dernières. Les super capacités sont ainsi chargées de fournir une forte puissance pendant un temps très bref et les domaines d'applications sont :

- l'informatique et les télécommunications : mémoires de sauvegarde en remplacement des batteries, association aux batteries en radiotéléphonie ... leurs robustesses, fiabilité et durée de vie équivalente à celle des composants passifs auxquels elles sont associées les rendent plus attractives par rapport aux générateurs électrochimiques.
- les alimentations de secours : avec une très grande durée de vie, une absence presque totale de défaillance, un fonctionnement sans maintenance, les super capacités sont de plus en plus préférées aux batteries dans les alimentations de secours. Néanmoins, afin de

compenser la décharge des super capacités, il est nécessaire de réguler la tension d'entrée de l'onduleur

- l'automobile : elles viennent en complément des batteries, permettant d'augmenter la puissance disponible, l'autonomie et la durée de vie des batteries. Elles permettent aussi une récupération efficace de l'énergie au freinage.

Les super capacités, en stockant directement l'énergie sous une forme électrique, offrent un avantage considérable. De manière réversible, elles fournissent instantanément et presque totalement l'énergie stockée. Leur nombre de cycles très élevés et leur bon rendement en font un composant de choix dans le domaine du stockage (**Fig.3.6.** – **Tab.3.5.**).



**Fig.3.6.** Schéma comparatif.

	<i>Condensateurs classiques</i>	<i>Super condensateurs</i>	<i>Batteries</i>
<b>Energie spécifique (Wh.kg<sup>-1</sup>)</b>	<0,1	1 à 10	20 à 100
<b>Puissance spécifique (Wh.kg<sup>-1</sup>)</b>	1 à 100	0,5 à 10	0,05 à 0,2
<b>Durée de vie (cycles)</b>	>10 <sup>5</sup>	>10 <sup>5</sup>	500 à 2000
<b>Durée de décharger nominale</b>	10 <sup>-6</sup> à 10 <sup>-3</sup> secondes	1 à 30 secondes	0,3 à 3 heures
<b>Durée de charge nominale</b>	10 <sup>-6</sup> à 10 <sup>-3</sup> secondes	1 à 30 secondes	1 à 5 heures

**Tab.3.5.** Tableau comparatif.

### III-5. Conclusions :

Dans ce chapitre, nous avons dressé un état des lieux du stockage d'électricité photovoltaïque. Pour faire face à cette demande croissante de puissance, on peut avoir recours à plusieurs solutions :

- augmenter la capacité du système de stockage
- optimiser le système de stockage par une hybridation permettant de séparer les fonctions puissance et énergie : la fonction énergie sera assurée par un composant de stockage ayant une grande constante de temps (batteries au plomb) et la fonction puissance par un composant dont la constante de temps est petite et donc une dynamique élevée (les super capacités) .

### CONCLUSIONS GENERALES :

Le travail effectuée dans le cadre de cette mémoire a permis de réaliser et d'optimiser un système photovoltaïque énergétiquement autonome. Pour ce faire, nous avons apporté une attention particulière à l'élaboration des différents modèles des composants constituant le système, en appréhendant de façon complète les problèmes de fonctionnement à un point optimal et l'association d'une source de stockage efficace. La prise en compte de ces deux points sur un même système a été la première difficulté à surmonter lors des simulations.

Pour répondre au premier problème il a fallu disposer d'un modèle de hacheur avec sa boucle de commande et donc effectuer des simulations avec des pas de temps très courts, tandis que le problème lié au stockage ne pouvait être appréhendé qu'avec des temps longs.

Notre système complet devait donc tenir compte simultanément de ces deux singularités. Un bon dimensionnement du stockage nous a permis d'assurer l'autonomie du système même dans des conditions défavorables. En effet, après un cycle de charge complète, les batteries reviennent dans leur état initial au bout de 24h, dès lors, un bilan d'énergie à leurs bornes s'avérerait bien équilibré.



**Bibliographie :**

[1]. T.T. Ha Pham, C. Claustres, F. Wurtz, S. Bacha, S. Poix, “Mise en œuvre de L’optimisation pour le dimensionnement et les études de faisabilité de systèmes multi sources Électriques dans le bâtiment” IBPSA France, 6 et 7 Novembre 2008, [www.ibpsafrance.net](http://www.ibpsafrance.net)

[2]. P. Rodents, G. Paganelli, A. Sciarretta et L. Gazelle, “Optimal power management of an experimental fuel cell/super capacitor-powered hybrid vehicle,” *Control Engineering Practice*, vol. 13, n° 1, January 2005, pp. 41-53.

[3]. S. H. Choir, J. Kim et Y. S. Yoon, “Fabrication and characterization of a LiCoO<sub>2</sub> battery– Super capacitor combination for a high-pulse power system,” *Journal of Power Sources*, vol. 138, n° 1-2, November 2004, pp. 360-363

[4]. A. Burke, “Ultra capacitors: why, how, and where is the technology,” *Journal of Power Sources*, vol. 91, n° 1, November 2000, pp. 37-50.

[5]. J. W. Dixon et M. Ortuzar, “Ultra capacitors + dc-dc converters in regenerative Braking system,” *IEEE Aerospace and Electronics Systems Magazine*, vol. 17, n° 8, august 2002, pp. 16–21

[6]. <http://www.iea.org>

[7]. “Energie solaire photovoltaïque”, Anne Laboure, Michel Villosz, 3e édition, Edition Dunod

[8]. L’énergie solaire photovoltaïque, <http://www.industrie.gouv.fr/portail/secteurs/enersolairephoto.html>

[9]. Le rayonnement solaire, <http://comprendre.meteofrance.com/>

- [10]. “Photopiles solaires”, Alain Rivaud, Edition Presses polytechniques et universitaires Remands
- [11]. Weidong Xiao, William G. Dunford, Patrick R. Palmer, Antoine Capel “Regulation of Photovoltaic Voltage” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol 54, n°3, pp. 1365-1374, June 2007
- [12]. “Convertisseurs photovoltaïques” Ludovic Protin, Stéphane Astier, Traite Génie Electrique D 3360, Techniques de l’ingénieur
- [13]. R.C Campbell “A Circuit-based Photovoltaic Array Model for Power System Studies” 39th North American Power Symposium, 2007. NAPS '07, pp.97 – 101, Sept. 30 2007-Oct. 2 2007
- [14]. V. Quashing, R. Hamish “numerical simulation of photovoltaic generators with shaded cells” 30th universities power engineering conference, Greenwich, Sept. 5-7, 1995, pp. 583-586
- [15]. M.A. de Blas , J.L. Torres, E. Prieto, A. Garcia “Selecting a suitable model for characterizing photovoltaic devices” Relevable Energie 25 (2002), pp. 371–380
- [16]. B. Multon, H. Ben Ahmed “Le stockage stationnaire d’énergie électrique : pourquoi et comment ?”, Revue 3E.I, n°48, pp. 18-29, mars 2007
- [17]. R. Kotz, M. Carlen “Principles and applications of electrochemical capacitors” Electrochimique Acta 45 (2000), pp. 2483–2498
- [18]. B. MULTON, J. RUER “Stocker l’électricité : oui, c’est indispensable et c’est possible. Pourquoi, ou, comment ? ”, Publication ECRIN en contribution au débat national sur l’énergie, avril 2003, téléchargeable : <http://www.ecrin.asso.fr/energies/>
- [19]. Philip Symons “Batteries for stationary standby and for stationary cycling applications, part 4: charge management” IEEE Power Engineering Society General Meeting, Volume: 1, pp. 157, July 2003

- [20]. N. Achaibou, M. Haddadi, A. Malek “Lead acid batteries simulation including experimental validation” *Journal of Power Sources* n°185 (2008), pp. 1484–1491
- [21]. Srdjan Lukic, Jian Cao, Ramesh Bansal, Fernando Rodriguez, Eli Emadi “Energy storage systems for automotive applications” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol 55, n°6, pp. 2258-2267, June 2008
- [22]. Tom E. Ruhlmann “Lead Acid Batteries For Stationary Float Service and Cycling Service Part 2: Selection Criteria” *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, pp. 153, July 2003
- [23]. “L’hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d’électricité pour systèmes photovoltaïques isolés.”, Julien Labbe, Ecole des Mines de Paris, These soutenue le 21 décembre 2006
- [24]. “Modélisation et caractérisation des super condensateurs a couche double électrique utilises en électronique de puissance”, Farid Belgacemi, Institut National Polytechnique de Lorraine, Thèse soutenue le 19 décembre 2001
- [25]. “Accumulateurs au plomb” Jack Robert, Jean Alize, *Traite Génie Electrique D 3352, Techniques de l’ingenieur*
- [26]. Ioannis Hadjipaschalis, Andreas Poulakis, Venizelos Efthimiou “Overview of current and future energy storage technologies for electric power applications” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* n°13 (2009), pp. 1513–1522
- [27]. James D. Maclay, Jacob Brower, G. Scott Samuelsson “Dynamic modeling of hybrid energy storage systems coupled to photovoltaic generation in residential applications” *Journal of Power Sources* n°163 (2007), pp. 916–925
- [28]. M.E. Glavin, Paul K.W. Chan, S. Armstrong, and W.G Hurley “A Stand-alone Photovoltaic Supercapacitor Battery Hybrid Energy Storage System” *13th Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2008*, pp. 1688-1695

[29]. <http://re.jrc.ec.europa.eu>

[30]. Julia Schiffer , Dirk Uwe Sauer , Henrik Bindner , Tom Cronin, Per Lundsager, Rudi Kaiser “Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems” Journal of Power Sources n°168 (2007), pp. 66–78

[31]. “Photovoltaic Generator Modeling for Large Scale Distribution System Studies”, Andrew S. Golder, Thesis of Drexel University, October 2006

[32]. “Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couple au réseau et associe a un accumulateur”, O. Géraud, Ecole Normale Supérieure de Cachan, Thèse soutenue le 9 septembre 2002

[33]. “Système photovoltaïque autonome: étude d’une structure modulaire a gestion repartie” Ariane Neusser, Thèse soutenue le 24 septembre 2004

[34]. Trishan Efram, Patrick L. Chapman “Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques”, IEEE Transactions on Energy conversion Volume 22, Issue 2, pp. 439 – 449, June 2007

[35]. T. A. Singo , A. Martinez , S. Saadate, " Using Ultra capacitors to Optimize Energy Storage in a Photovoltaic System” Electrical Engineering Research Report – vol. 2, September 2009 (source <http://emsolar.ee.tu-berlin.de/lehre/english/pv1/>)

