

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

Université de Bouira
Akli Mohand Oulhadj



جامعة البويرة
أكلي محمد أولحاج

Présenté au département de Génie Electrique

Faculté des Sciences et Sciences Appliquées

Pour obtenir le diplôme

De Master

Option:

Conversion et Gestion de l'énergie électrique

Présenter par :

Mr. KOUTINI Hicham.

Mr. RECHAM Amirouche

Thème

**APROCHE BOND GRAPH POUR LA MODELISATION ET LA
SIMULATION D'UNE CENTRALE PHOTOVOLTAIQUE
INSTALLE EN ALGERIE**

Soutenu le devant le juré composé de :

M^{me} . MADI SAIDA

Maître Assistant à l'université de Bouira

Encadreur

M. ISSOUNI SALIM

Maître Assistant à l'université de Bouira

Président

M. SAIDI MOHAMED

Maître Assistant à l'université de Bouira

Examineur

2016

Sommaire

Sommaire

REMERCIEMENTS.....	I
DIDICACE	II
Liste des symboles.....	V
Liste des figures	VI
Liste des tableaux.....	VIII
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur la méthodologie de bond graph.	
I. 1.Introduction.....	4
I.2.Les transferts de puissance.....	4
I.3. Les variables généralisées.....	4
I.3.1.Les éléments bond graphs.....	5
I .3.2.Les Junction.....	9
I .3.3.La causalité	10
I .4.Les étapes Modélisation par bond graph.....	12
I .5.Conclusion.....	14
Chapitre II : Application de l’approche bond graph sur un panneau photovoltaïque.	
II.1. Introduction.....	16
II.2. La cellule photovoltaïque.....	16
II.2.1. Principe de fonctionnement d’une cellule photovoltaïque.....	16
II.2.2. Modelé mathématique d’une cellule solaire réelle.....	17
II.3. Modelé mathématique d’un générateur photovoltaïque.....	25
II.3.1. Caractéristiques d’un générateur photovoltaïque.....	26
II.3.2. Protection d’un générateur photovoltaïque (panneau PV).....	26

Sommaire

II.3.3. Model mathématique d'un générateur photovoltaïque (panneau PV).....	26
II.3.4. L'évolution de courant en fonction de la tension d'un générateur PV.....	27
II.4. Conclusion.....	32
Chapitre III : Modélisation et simulation d'une centrale photovoltaïque.	
III.1. Introduction	34
III.2. Présentation du site d'Alger (CDER).....	34
III.3. Les données météorologiques du site d'Alger.....	35
III.4. Simulation d'une centrale PV installé à Alger (CDER).....	36
III.4. 1 Simulation d'un module photovoltaïque installé à Alger (CDER).....	36
III.4. 2 Le générateur photovoltaïque installé à Alger (CDER).....	39
III.4.3. Simulation d'un générateur PV installé à Alger (CDER).....	41
III.5.les convertisseurs.....	43
III.5.1. La technologie des onduleurs couplés au réseau.....	43
III.5.2. système PV connecté au réseau.....	43
III.5.3. Le convertisseur continu –continu DC /DC	43
III.5.4. Le convertisseur continu-alternatif DC/AC	44
III.6. conclusion.....	46
Conclusion générale	48
RESUME	IX

Remerciements

Avant tout nous tenons nos remerciements à notre dieu de nos avoir Donné la force et le courage.

A la suite Nous tenons à remercier vivement M^{me}.

S. MAdi notre promotrice qui a fourni des Efforts énormes, par ses Informations ses conseils et ses encouragements.

Nous tenons également à remercier messieurs les membres de jury pour L'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance

A tous ce qui furent à un moment ou à toute instante partie prenante de ce travail.

Nos plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de près et de loin ont contribué à la réalisation de cette mémoire.

Dédicaces

*Avant tous, je remercie dieu le tout puissant de
M'avoir donné le courage et la patience pour réaliser
Ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.*

Je dédie ce modeste travail :

*A mes très chers parents, que dieu les garde et les
Protège pour leurs soutien moral et financier, pour
Leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.*

A mes frères Chafik et Aymene

A mes sœurs

*A tous ce que j'aime et qui m'aiment
A tous mes collègues d'études surtout ceux
D'électrotechnique.*

Hicham.

Je dédie ce modeste travail :

*A mes chers parents
A tous mes frères et sœurs
A tous ceux qui me sont chère*

Amirouche

Abréviation

PV	: Photovoltaïque.
GPV	: Générateur photovoltaïque.
DC	: Courant Continu.
AC	: Courant alternatif.
MPPT	: Maximum Power Point Tracking.
PPM	: Point de puissance maximale.
KWc	: Kilo-Watt crête.
CDER	: Centre de Développement des Énergies Renouvelable.
[EPST]	: Etablissement public à caractère scientifique et technologique.
[UDES]	: Unité de développement des équipements solaires.
[URAER]	: Unité de recherche appliquée en énergies renouvelables.
[URERMS]	: Unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien.

Symboles

T_c	: La température absolue [$^{\circ}\text{K}$]. ;
I_d	: Le courant circulant dans la diode [A].
E_g	: Énergie de Gap du matériel de la cellule PV en [ev].
I_s	: Le courant de saturation [A].
I_{pv}	: Courant générer par la cellule photovoltaïque [A].
V	: La tension de sortie d'un panneau photovoltaïque [V].
T_{ref}	: Température de référence des cellules PV [$^{\circ}\text{K}$].
P_{max}	: La puissance électrique maximale [W].
η	: Rendement.
N_s	: Nombres des cellules en sérier.

Liste des symboles et des abréviations

N_p	: Nombres des cellules en parallèle.
V_{OC}	: Tension du circuit ouvert [V].
$I_{SC} = I_{CC}$: Courant de court-circuit [A].
$I_{mpp} = I_m$: Courant d'un module PV au point de puissance maximale [A].
G, G_{REF}	: L'éclairement réels et à la condition de référence (W/m^2).
R_s	: La résistance série (Ω).
K	: Constante de Boltzmann [$1,381 \cdot 10^{-23} J/K$].
I_{ph}	: Photo-courant de la cellule [A]
I_{sat}	: Courant de saturation inverse de la diode [A].
$V_t = \frac{nkt}{q}$: Tension thermique de la diode.
n	: Facteur d'idéalité de la diode ($1 < n < 2$).
q	: Charge de l'électron ($1,6 \cdot 10^{-19} C$).
k	: Constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} J/K$).
P_m	: La puissance optimale [W]

LISTE DES FIGURES

LISTE DES FIGURES

Figure .I.1. Bond graph : transfert de puissance de A vers B.....	4
Figure.I.2. Elément R.....	6
Figure. I.3. Elément C.....	7
Figure .I.4 : Elément I.....	8
Figure I.5 : La causalité.....	10
Figure .I.6 : Les étapes de modélisation par bond graph.....	13
Figure II.1 : Coupe transversale d'une cellule photovoltaïque (PV).....	17
Figure II.2: Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.....	18
Figure II.3: Modèle bond graph de la figure II.2: a)modèle acausal b) modèle causa....	18
Figure II.4: Bloc diagramme de le model bond graph représenté dans la figure II.3.....	18
Figure II.5: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque sans résistance shunt.	21
Figure II.6: Modèle bond graph de la figure II.5: a) modèle acausal, et b) modèle causal.	21
Figure II.7: Bloc diagramme de le model bond graph représenté dans la figure II.6.....	21
Figure II.8: Schéma électrique équivalent idéal d'une cellule photovoltaïque.....	23
Figure II.9: Modèle bond graph de la figure II.8: a) modèle acausal, et b) modèle causal.	24
Figure II.10: Bloc diagramme de le model bond graph représenté dans la figure II.9.....	24
Figure II.11: Un générateur photovoltaïque.....	25
Figure II.12 : Le courant et la puissance d'un générateur photovoltaïque en fonction de la leur tension pour les conditions climatiques standards.....	28
Figure II.13 : Le courant d'un générateur photovoltaïque en fonction de sa tension pour différents éclairagements.....	29

LISTE DES FIGURES

Figure II.14 : La puissance d'un générateur photovoltaïque en fonction de sa tension pour différents éclairagements.....	29
Figure II.15 : Le courant d'un générateur photovoltaïque en fonction de sa tension pour différents éclairagements et température.....	30
Figure II.16 : La puissance d'un générateur photovoltaïque en fonction de sa tension pour différents éclairagements et température.....	30
Figure II.17 : Le courant d'un générateur photovoltaïque en fonction de sa tension pour différents éclairagements et température.....	31
Figure II.18 : La puissance d'un générateur photovoltaïque en fonction de sa tension pour différents éclairagements et température.....	31
Figure. III.1: Bloc diagramme du modèle comportemental de la centrale.....	35
Figure. III.2: Le courant en fonction de la tension d'un module photovoltaïque de type Isofoton 106 Wc/12 V du janvier au juin.....	37
Figure. III.3: Le courant en fonction de la tension d'un module photovoltaïque de type Isofoton 106 Wc/12 V du juillet au décembre.....	37
Figure. III.4: La puissance en fonction de la tension d'un module photovoltaïque de type Isofoton 106 Wc/12 V du janvier au juin.....	38
Figure. III.5: La puissance en fonction de la tension d'un module photovoltaïque de type Isofoton 106 Wc/12 V du juillet au décembre.....	38
Figure III.6 : Installation du générateur photovoltaïque sur le toit de CDER.....	40
Figure III.7 : Schéma d'une partie de la centrale de production d'électricité d'un système photovoltaïque installé au CDER.....	40
Figure III.8 : Le courant et la puissance d'un générateur photovoltaïque (sous-champs photovoltaïque de l'installation) en fonction de leur tension pour les conditions climatiques standards.....	41
Figure III.9: La puissance d'un générateur photovoltaïque en fonction de sa tension pour les conditions climatiques de l'année 2005.....	42
Figure III.10 : Le courant d'un générateur photovoltaïque en fonction de sa tension pour les conditions climatiques de l'année 2005.....	42
Figure III.11 : Système PV connecté au réseau électrique.....	43
Figure III.12 : Modèle bond graph de convertisseur.....	45
Figure. III.13: La tension d'une centrale photovoltaïque installée à Alger (CDER).....	45
Figure. III.14: La tension d'une centrale photovoltaïque installée à Alger (CDER).....	46

Liste des tableaux

Tableau I .1 : Equivalences des variables généralisées dans des domaines physiques...5
Tableau I .3 : Affectation de causalité pour le graphique obligatoire élément.....11
Tableau II.1 : Listes des Acronymes et Symboles.....27
Tableau III.1: Les caractéristiques climatiques du site d'Alger pour l'année 2005.....35
Tableau III.2 : la puissance maximale calculée et sa correspondant courant et voltage d'un module photovoltaïque de type Isonfoton 106w/12v pour l'année 2005.....39

Introduction générale :

L'augmentation du coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part, font que l'énergie photovoltaïque devient de plus en plus une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités de tout point du globe terrestre.

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par l'ensemble de cellules dites photovoltaïque, basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque, qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule photovoltaïque. L'association de plusieurs cellules photovoltaïques en série/parallèle donne lieu à un module photovoltaïque.

Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière photovoltaïque et consiste essentiellement à la modélisation et l'interconnexion du système photovoltaïque au réseau électrique dans le site expérimental du laboratoire CDER (Centre de Développement des Énergies Renouvelables) à Bouzaréah, Alger.

Pour déterminer les équations mathématiques des différents éléments du système, nous sommes passés par une étape de modélisation exploitant la technique bond graph. Cette technique apparaît actuellement comme un outil puissant pour la modélisation des systèmes dynamiques grâce à sa souplesse et à la possibilité d'une analyse comportementale directe du système.

Notre mémoire comporte trois chapitres:

Au premier chapitre, nous présentons succinctement le formalisme Bond Graph (BG) que nous utilisons au cours de nos travaux.

Au deuxième chapitre, l'application de la méthodologie bond graph sur une cellule photovoltaïque puis un panneau photovoltaïque sera effectué, où la simulation du modèle mathématique obtenu d'un générateur photovoltaïque de type Isofoton 106 Wc/12 V pour les différentes conditions climatiques, notamment :

- (i) les conditions climatiques standards,
- (ii) pour les différents niveaux d'éclairements à température maintenue 25°C,

Introduction générale

- (iii) pour les différents niveaux de la température à l'éclairement maintenue 1000 W/m^2 ,
- (iv) pour les différentes valeurs de la température et de l'éclairement en même temps.

Au troisième chapitre, nous présentons les résultats de la simulation d'une centrale photovoltaïque de puissance 1MW interconnectée au réseau (CDER), avec les grandeurs simulées pour des profils d'éclairement et de températures réelles mesurées au toit du laboratoire CDER, les résultats de simulations sont ensuite interprétés.

Enfin, nous terminons cette étude par une conclusion générale qui résume les travaux réalisés.

Chapitre I : Généralités sur la méthodologie de bond graph.

I.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons succinctement le formalisme Bond Graph (BG) que nous utilisons au cours de nos travaux.

Le domaine du Génie Electrique est au cœur et à l'interface avec plusieurs disciplines connexes, mettant en œuvre des domaines physiques différents, électrique bien sûr, mais aussi thermique, magnétique, mécanique, hydraulique, chimique,.... Parmi ces disciplines, il existe un dénominateur commun lié au fait que des échanges de puissances et d'énergie s'effectuent au sein et entre chaque domaine. Une chaîne de traction, telle que celle que nous considérons dans ce mémoire [1].

I.2. Les transferts de puissance :

La méthodologie bond graph est entrée en Europe à la fin de l'années 70 par les Pays-Bas (Université de Twente) et la France (société Alstom). L'outil bond graph est maintenant utilisé régulièrement dans quelques entreprises, en particulier dans l'industrie automobile (PSA, Renault, Ford, Toyota, General Motors,...) [2].

Un modèle bond graph est une représentation graphique de type réseau du système physique. Cette représentation est fondée sur l'hypothèse de réticulation qui permet une décomposition du système en un ensemble de sous-systèmes élémentaires échangeant de la puissance entre eux. Cette puissance est transmise de manière à assurer la conservation de l'énergie, mais aussi sa continuité. Le transfert de puissance (ou flux d'énergie) entre deux sous-systèmes est représenté par une demi flèche qui correspond au « bond » du bond graph. La puissance instantanée échangée se calcule par le produit d'une variable de flux f et d'une variable d'effort e indépendamment du domaine considéré. Le sens de la demi flèche et celui correspondant au sens positif de la puissance et de la variable de flux (figure I.1) [3], [4], et [5].

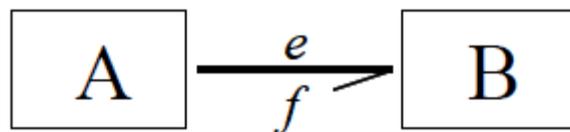


Figure I.1. Bond graph : transfert de puissance de A vers B

I.3. Les variables généralisées

Chaque lien de puissance véhicule deux informations simultanément : l'effort e et le flux f (voir Figure I.1). Ce sont les variables généralisées de puissance (leur produit étant la

puissance transférée). Nous utilisons aussi des variables généralisées d'énergie : le moment p (l'intégrale de l'effort par rapport au temps) et le déplacement q (l'intégrale du flux par rapport au temps). Nous présentons dans le Tableau I.1 les variables associées aux variables généralisées dans plusieurs domaines physiques.

Tableau. I .1. Equivalences des variables généralisées dans des domaines physiques [6].

Domaine	Effort e	Flux f	Moment généralisé p	Déplacement généralisé q
Electrotechnique	Tension u	Courant i	Flux magnétique λ	Charge q
Mécanique de translation	Force F	Vitesse v	Quantité de mouvement p	Déplacement x
Mécanique de rotation	Couple C	Taux de rotation ω	Moment cinétique σ	angle θ
Hydraulique et pneumatique	Pression P	Débit volumique q_v	Impulsion p	Volume V
thermique	Température T	Flux d'entropie q_s		Entropie S
chimie	Potentiel chimique μ	Flux molaire q_m		Nombre de moles N

I.3.1. Les éléments bond graphs:

Les éléments basiques des BG sont au nombre de neuf [5]. Nous utilisons les éléments pour représenter des phénomènes qui lient les variables généralisées. Nous pouvons les séparer en trois catégories suivantes :

- Catégorie d'éléments passifs : R, C et I;
- Catégorie d'éléments actifs : Se, Sf ;
- Catégorie d'éléments de jonction : 0, 1, TF, GY.
- En plus de ces éléments il y a deux détecteurs : détecteurs d'effort (De) et de flux (Df) sont pour mesurer les variables correspondantes dans un modèle bond graph. Nous les considérons idéaux : ils ne consomment pas de puissance; nous utilisons donc un lien de type signal (une flèche) [15].

➤ **Les éléments passifs :**

Les éléments actifs sont R, I et C. Ils peuvent être de caractéristique linéaire ou non linéaire. Un élément R est dissipatif d'énergie, sous forme de chaleur. Les éléments I et C sont les éléments de stockage d'énergie. Les éléments passifs consomment la puissance et la transforment soit en énergie dissipée comme chaleur dans les éléments R, soit en énergie stockée dans les éléments I (énergie cinétique) et C (énergie potentielle). L'orientation de la demi-flèche est donc entrante vers l'élément [7].

➤ **L'élément résistif R :**

Cet élément est utilisé pour modéliser tout phénomène physique liant l'effort e et le flux f [1]. La représentation générale de cet élément est donnée par la Figure I.2 [1].

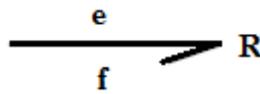


Figure.I.2. Élément R

La loi qui caractérise l'élément **R** s'est donnée par l'équation suivante:

$$\Phi_R = (e, f) = 0 \quad (\text{I.1})$$

Si l'élément R est linéaire la relation entre l'effort e et le flux f est donnée par l'équation suivante:

$$e(t) = R \cdot f(t) \quad (\text{I.2})$$

Si l'élément R est non linéaire la relation entre l'effort e et le flux f est donnée par l'équation suivante:

$$e(t) = \Psi_R \cdot f(t) \quad (\text{I.3})$$

On trouve plusieurs cas si l'élément **R** est linéaire [1] :

- Cas mécanique de translation: $F(t) = b \cdot V(t)$ b : frottement.
- Cas mécanique de rotation: $\tau(t) = B \cdot w(t)$ B : frottement.
- Cas électrique : $U(t) = R_1 I(t)$ R_1 : résistance, diode.
- Cas hydraulique : $P(t) = R_2 \cdot Q(t)$ R_2 : résistance pneumatique

➤ **L'élément capacitif c :**

L'élément C modélise tout phénomène liant l'effort e au déplacement q [12]. La représentation générale de cet élément est donnée dans la figure I.3 :

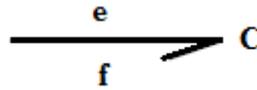


Figure. I.3. Elément C

La loi qui caractérise l'élément C s'est donnée par l'équation suivante:

$$\Phi_c(e, q) = 0 \quad (\text{I.4})$$

Si l'élément C est linéaire la relation entre l'effort et le flux est donnée par l'équation suivante:

$$q(t) = C \cdot e(t) \quad (\text{I.5})$$

Si l'élément C est non linéaire est donnée par l'équation suivante:

$$q(t) = \Psi_c \cdot e(t) \quad (\text{I.6})$$

On obtient la forme intégrale suivante :

$$q(t) = \frac{1}{C} \int_0^t f(\tau) d\tau \quad (\text{I.7})$$

Ce qui donne en linéaire :

- **En mécanique de translation:**

$$F(t) = K \cdot x(t) = \frac{1}{C} \cdot \int_0^t V(\tau) d\tau \quad (\text{I.8})$$

Avec K : raideur d'un ressort

- **En mécanique de rotation :**

$$\tau(t) = K1 \cdot \theta(t) = K1 \cdot \int_0^t \theta(\tau) d\tau \quad (\text{I.9})$$

Avec K1: raideur d'un ressort de torsion.

- **En électrique :**

$$U(t) = \frac{q}{C_1} = \frac{1}{C_1} \cdot \int_0^t I(\tau) d\tau \quad (\text{I.10})$$

Avec C_1 : capacité d'un condensateur.

- **En hydraulique :**

$$P(t) = \rho \cdot g \cdot H = \frac{\rho \cdot g}{S} \cdot \int_0^t Q(\tau) d\tau \quad (\text{I.11})$$

Avec $C = (S/\rho) \cdot g$: capacité associée à une cuve.

L'élément **C** transforme la puissance qui lui est fournie en énergie stockée par la loi :

$$e = \Psi_c(\int f dt) = \Psi_c(q) = e(q) \quad (\text{I.12})$$

Donc l'équation d'énergie s'écrit sous la forme :

$$E_C = \int_{q_0}^{q_t} e(q) dq + E(q_0) \quad (\text{I.13})$$

➤ **L'élément inertiel I :**

Il modélise tout phénomène physique liant le flux **f** au moment **p**. La représentation graphique de cet élément est donnée par la **Figure I.4 [8]**.

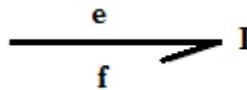


Figure I.4. Élément I

L'équation caractéristique de l'élément **I** est donnée par l'équation suivante:

$$\Phi_I(p, f) = 0 \quad (\text{I.14})$$

Si l'élément **I** est linéaire la relation entre l'effort **e** et le flux **f** est donnée par l'équation suivante :

$$p(t) = I \cdot f(t) \quad (\text{I.15})$$

Si l'élément **I** est non linéaire est donnée par l'équation suivante :

$$p(t) = \Psi_I \cdot f(t) \quad (\text{I.16})$$

La forme de $f(t)$ obtenue est une forme intégrale qui est donnée par l'expression:

$$f(t) = \frac{1}{I} \cdot \int_0^t e(\tau) d\tau \quad (\text{I.17})$$

Qui se donne en linéaire les cas suivants:

- **En mécanique de translation :**

$$F(t) = M \cdot \frac{dv}{dt} V(t) = \frac{1}{M} \cdot \int_0^t F(\tau) d\tau \quad (\text{I.18})$$

Avec M : masse en mouvements.

- **En mécanique de rotation :**

$$\tau(t) = J \cdot \frac{dW}{dt} W(t) = \frac{1}{J} \cdot \int_0^t \tau(\tau) d\tau \quad (\text{I.19})$$

Avec J : inertie en rotation.

- **En électrique :**

$$U(t) = L \cdot \frac{dI}{dt} I(t) = \frac{1}{L} \cdot \int_0^t U(t) dt \quad (\text{I.20})$$

Avec L : inductance d'une bobine.

- **En hydraulique :**

$$P(t) = \frac{\rho \cdot l}{S} \cdot S \cdot \frac{dQ}{dt} Q(t) = \frac{1}{\rho \cdot l} \cdot \int_0^t P(\tau) d\tau \quad (\text{I.21})$$

$I = \rho \cdot l / S$: inertie d'un fluide en mouvement.

L'élément **I** est caractérisé par la loi :

$$f = \Psi_1(\int e dt) = \Psi_1(p) = f(p) \quad (\text{I.22})$$

L'équation d'énergie s'écrit sous la forme :

$$E_t = \int_{p_0}^{p_f} f(p) dp + E(p_0) \quad (\text{I.23})$$

➤ **Les éléments actifs :**

Ce sont des sources d'effort ou de flux. Ces dernières peuvent avoir une valeur indépendante de toute influence extérieure symbolisées par **Se** pour des sources d'effort ou **Sf** pour des sources de flux, ou modulée selon un signal (symbolisées par **MSe** ou **MSf**). Ces éléments fournissent la puissance (positive ou négative) au système. Par conséquent, le sens de la demi-flèche sortant de l'élément est obligatoire [9] [12].

I.3.2. Les Junction :

Les jonctions servent à coupler les éléments précédemment présentés. Celles-ci sont conservatives de puissance. Quatre types de jonction sont définis. Il s'agit des jonctions 0, 1, TF (transformateur) et GY (gyrateur) [8]:

- Les jonctions 1 sont des jonctions iso-flux.
- Les jonctions 0 sont des jonctions iso-effort.
- Les jonctions TF transforment les variables effort - effort, flux - flux.

- Les jonctions GY transforment les variables effort - flux, flux – effort [10].

I .3.3.La causalité :

La causalité doit être indiquée sur un bond graph afin que celui-ci soit traité de façon numérique ; c'est d'ailleurs le logiciel qui s'en charge. On rappelle que la causalité consiste à imposer un ordre de cause à effet dans les relations entre les variables représentant un système. Sur un BG, la causalité est marquée par un trait perpendiculaire au lien BG à l'une des extrémités de celui-ci (Figure I.5). Par convention, on impose l'effort du côté du trait de causalité. Le flux est donc imposé de l'autre côté du lien [12][14].

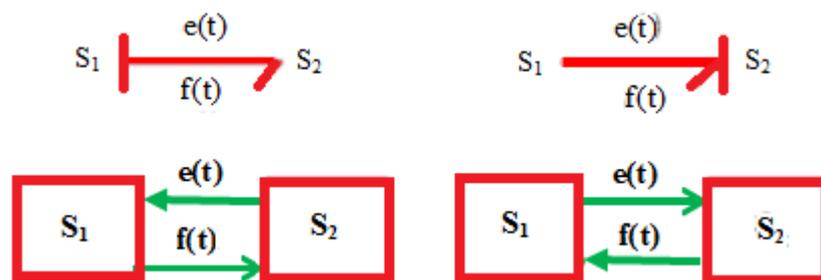


Figure I.5. La causalité

La causalité suit des règles pour les éléments et les jonctions [11]:

- Causalité obligatoire pour les sources.
- Causalité obligatoire pour les éléments R avec des lois non inversibles.
- Causalité intégrale préférentielle pour les I et C, éléments de stockage d'énergie.
- Jonction 0 : un seul trait causal près du 0, ce qui veut dire qu'un seul lien (donc élément) impose son effort aux autres liens (donc éléments attachés à la jonction 0).
- Jonction 1 : un seul trait causal loin du 1, ce qui veut dire qu'un seul lien (donc élément) impose son flux aux autres liens (donc éléments attachés à la jonction 1).

Causalité arbitraire pour les éléments R linéaires pour respecter les restrictions de causalité aux jonctions.

Tableau I.2 résume les éléments de bond graph et ces correspondant causalité, symbole, loi générique et schéma block.

Tableau .I .2: Affectation de causalité pour les éléments de bond graph [11].

Elément	Causalité	Symbole	Loi générique	Schéma bloc	
Eléments actifs	obligatoire		e imposé par Se		
			f imposé par Sf		
Eléments passifs	intégrale		$F_I := \Psi_I(\int e_i(\tau)d\tau)$		
			$e_c = \Psi_c(\int f_c(\tau)d\tau)$		
	dérivée		$e_I = \Psi_I^{-1}(\frac{df_i}{dt})$		
			$f_C = \Psi_C^{-1}(\frac{de_c}{dt})$		
	Arbitraire (cas linéaire) ou non arbitraire (cas non linéaire)	Arbitraire (cas linéaire) ou non arbitraire (cas non linéaire)		$e_R = R f_R$	
				$f_R = \frac{1}{R} e_R$	$f_R = \Psi_R^{-1}(e_x)$
jonctions	Restriction de causalité		$f_1 = f_2 = f_3$ $e_1 = e_2 + e_3$		
			$e_1 = e_2 = e_3$ $f_1 = f_2 + f_3$		

		$e_1 = m e_2$ $f_2 = m f_1$	
		$e_2 = m^{-1} e_1$ $f_1 = m^{-1} f_2$	
		$e_1 = r f_2$ $e_2 = r f_1$	
		$f_1 = r^{-1} e_2$ $f_2 = r^{-1} e_1$	

I.4. Les étapes Modélisation par bond graph :

La modélisation à l'aide de l'outil bond graph s'effectue en cinq étapes [12] :

- analyse fonctionnelle : le système est décomposé en sous-systèmes qui échangent de la puissance, ce qui conduit au bond graph à mots.
- analyse phénoménologique : en fonction des hypothèses de modélisation et du domaine de validité (dynamique, fréquentiel) recherché pour le modèle, les composants et phénomènes physiques qui dissipent ou qui stockent de l'énergie sont identifiés, et des bilans d'énergie, de masse, de quantités de mouvement sont effectués. Ceci conduit au bond graph détaillé.
- analyse causale : la mise en évidence des relations causales permet d'identifier d'éventuels problèmes à venir pour la simulation du modèle (équations implicites, algèbre-différentielles), ce qui peut amener le modélisateur à revenir sur ses hypothèses de modélisation. Le modèle obtenu est un bond graph causal.
- analyse structurelle : l'application de procédures graphiques (manipulation de la causalité, parcours de chemins sur le bond graph) permet de mettre en évidence des propriétés structurelles du modèle (donc valables quelles que soient les valeurs numériques des paramètres).
- spécification des lois caractéristiques des éléments retenus dans la phase « analyse phénoménologique » et écriture des modèles mathématiques globaux associés au modèle bond graph.

Une fois ces cinq étapes réalisées, le modèle peut être simulé soit directement sous forme graphique à l'aide de logiciels possédant une interface bond graph (20Sim, Symboles,...) ou sous forme mathématique à l'aide de logiciels classiques comme Matlab. Figure .I.6 résume les étapes de modélisation par la méthodologie bond graph.

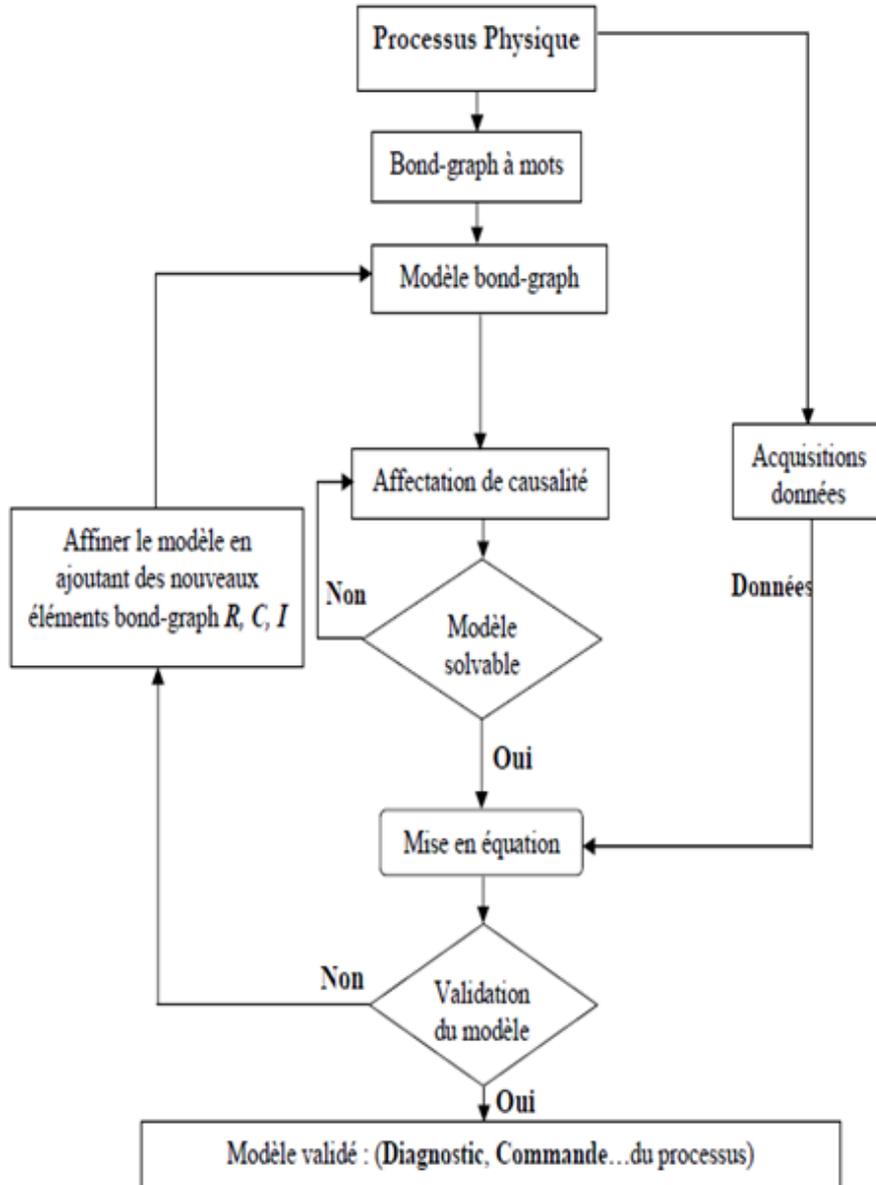


Figure .I.6 : Les étapes de modélisation par bond graph [8].

I.5.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les généralités sur la méthodologie bond graph qui est constitué de neuf éléments de base avec deux détecteurs, et elle basée sur le circuit électrique équivalent et la présentation graphique.

Dans le 2^{ème} chapitre, l'application de la méthodologie bond graph sur un panneau photovoltaïque sera effectuée.

Chapitre II : Application de l'approche bond graph sur un panneau photovoltaïque

II.1. Introduction :

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble des cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou en parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électrique désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert [14].

Dans ce chapitre, l'application de la méthodologie bond graph sur un panneau photovoltaïque sera effectuée.

II.2. La cellule photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », ce dernier a été découvert par Edmond Becquerel en 1839 [14].

II.2.1. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé « effet photovoltaïque » qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé, de sa disposition, de la température de la cellule ainsi que le vieillissement de la cellule [15].

La figure II.1 illustre une cellule photovoltaïque typique. Elle montre clairement sa constitution détaillée. Une cellule photovoltaïque est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P (dopée au bore) et l'autre couche dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule [16].

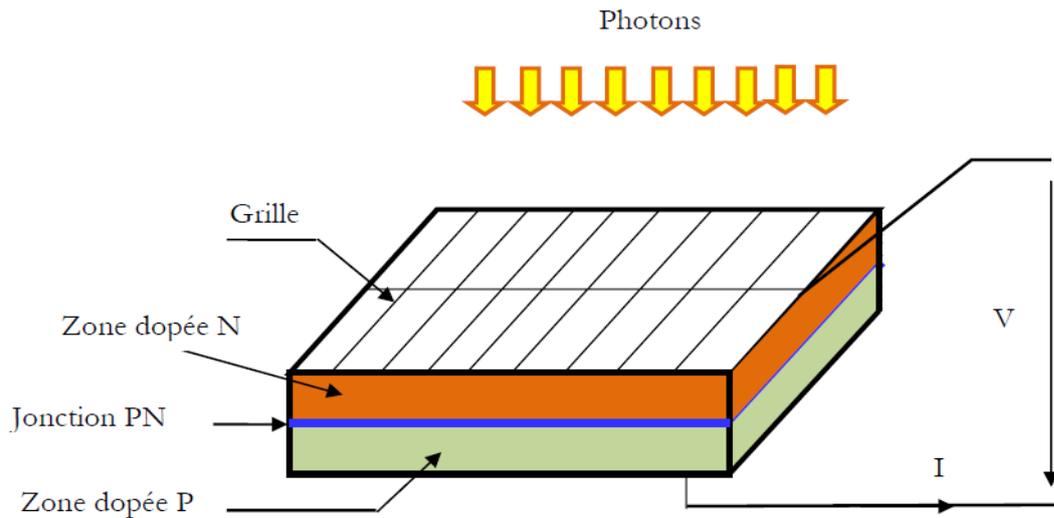


Figure II.1 : Coupe transversale d'une cellule photovoltaïque [17].

II.2.2. Modèle mathématique d'une cellule solaire réelle :

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles de la cellule photovoltaïque qui diffèrent entre eux par le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et de l'intensité de courant de sortie [19], [18]. Dans notre travail, la cellule photovoltaïque est représentée par un circuit électrique équivalent à une diode.

II.2.2. 1. Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque à une seule diode :

L'utilisation de circuit électrique équivalent permet de modéliser les caractéristiques de la cellule photovoltaïque (générateur photovoltaïque élémentaire). Plusieurs modèles mathématiques sont utilisés pour simuler le fonctionnement d'une cellule photovoltaïque. Ces modèles se différencient par la méthode de calcul et le nombre de paramètres intervenants dans la caractéristique courant-tension [19]. Dans notre travail, nous avons choisi un modèle simple, modèle d'une cellule photovoltaïque à une seule diode.

Le circuit électrique équivalent à une cellule photovoltaïque est représenté par la figure II.2 qui consiste en une source de courant idéale, branchée avec une diode en parallèle, une résistance série R_s et une résistance parallèle R_{sh} . La source de courant délivre un courant I_{ph} , directement proportionnel à l'intensité de la lumière, alors que la diode D décrit les propriétés semi-conductrices de la cellule photovoltaïque.

En nous référant à figure II.3 et en utilisant les lois de la méthodologie bond graph représentées dans le chapitre I. les équations caractéristiques sont obtenues comme suit :

➤ **Jonction 0 :**

$$e_1 = e_2 = e_3 = e_4 \quad (\text{II.1})$$

$$f_2 = f_1 - f_3 - f_4 = I_{\text{ph}} - f_3 - f_4 \quad (\text{II.2})$$

-Les équations des éléments sont données par les équations suivantes :

$$e_2 = U_D = n V_t \ln \left(\frac{f_2}{I_S} \right) \quad (\text{II.3})$$

$$f_1 = I_{\text{ph}} \quad (\text{II.4})$$

$$e_3 = f_3 R_{\text{ch}} \quad (\text{II.5})$$

➤ **Jonction 1:**

$$e_6 = e_4 - e_5 \quad (\text{II.6})$$

$$e_4 = e_5 + e_6 \quad (\text{II.7})$$

$$f_4 = f_5 = f_6 \quad (\text{II.8})$$

Les équations des éléments sont données par les équations suivantes :

$$e_6 = V \quad (\text{II.9})$$

$$e_5 = R_S f_5 \quad (\text{II.10})$$

D'après l'équation(II.1) on a $e_2 = e_4$. On remplace l'équation (II.3) et (II.10) dans (II.6) On aura la tension de sortie e_6 :

$$e_6 = n v_t \log \left[\left(\frac{f_1 - f_3 - f_4}{I_{\text{sat}}} \right) + 1 \right] - R_S f_5 \quad (\text{II.11})$$

On remplaçant l'équation (II.5) dans l'équation (II.11) pour développer l'équation de la tension de sortie e_6 :

$$e_6 = n v_t \log \left[\left(\frac{f_1 - \frac{1}{R_{\text{ch}}} e_3 - f_4}{I_{\text{sat}}} \right) + 1 \right] - R_S f_5 \quad (\text{II.12})$$

On remplaçant les équations (II.4) et (II.7) et(II.8) dans l'équation (II.12) on aura l'équation de la tension de sortie e_6 :

$$e_6 = n v_t \log \left[\left(\frac{I_{ph} - \frac{1}{R_{ch}}(e_5 + e_6) - f_6}{I_{sat}} \right) + 1 \right] - R_S f_5 \quad (II.13)$$

On remplaçant l'équation (II.10) dans l'équation (II.13) on aura l'équation finale de la tension de sortie $e_6 = V$, comme suit :

$$V = e_6 = n v_t \log \left[\left(\frac{I_{ph} - \frac{1}{R_{ch}} R_S f_5 - \frac{1}{R_{ch}} e_6 - f_6}{I_{sat}} \right) + 1 \right] - R_S f_5 \quad (II.14)$$

Donc ;

$$V = n v_t \log \left[\left(\frac{I_{ph} - \frac{1}{R_{ch}} R_S I - \frac{1}{R_{ch}} V - I}{I_{sat}} \right) + 1 \right] - R_S I \quad (II.15)$$

A partir de cette équation on peut déduire l'équation mathématique du courant en fonction de la tension d'une cellule photovoltaïque à une seule diode, comme suit:

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{R_S I + V}{n v_t} \right) - 1 \right] - \frac{1}{R_{ch}} (R_S I + V) \quad (II.16)$$

II.2.2. 2. Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque à une seule diode sans la résistance shunt :

En pratique la résistance shunt (parallèle) est très grande, à partir de ca on peut l'enlever du circuit électrique équivalent [20]. La figure II.5 illustre le circuit électrique équivalent au modèle à une diode sans la résistance shunt [18], [21]. Le model bond graph de ce circuit électrique est représenté dans la figure II.6, et le bloc diagramme déduit du ce modèle bond graph est représentée dans la figure II.7.

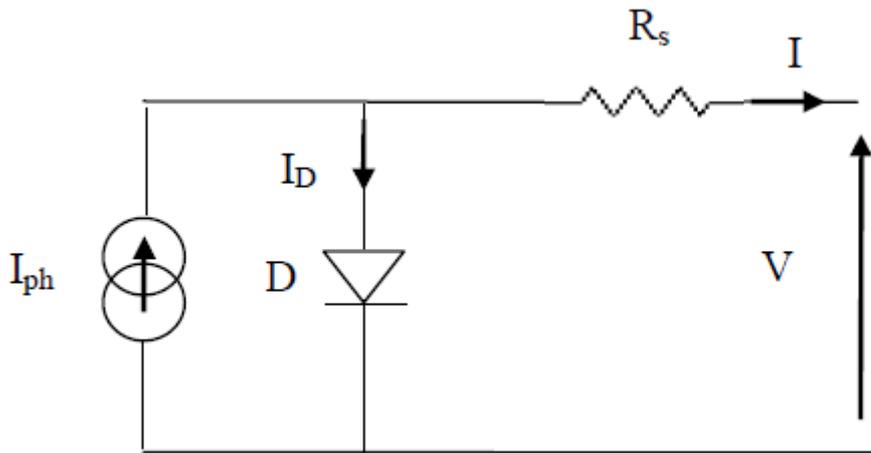


Figure II.5: Schéma électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque sans résistance shunt

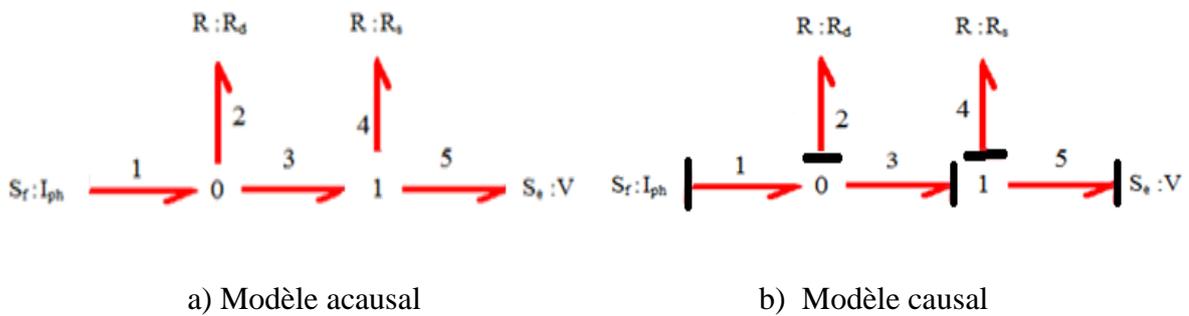


Figure II.6: Modèle bond graph de la figure II.5: a) modèle acausal, et b) modèle causal

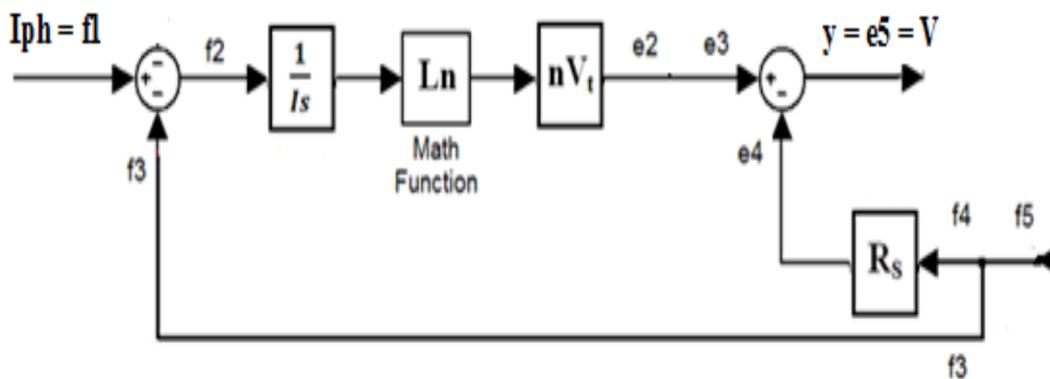


Figure II.7: Bloc diagramme du modèle bond graph représenté dans la figure II.6.

En se référant à la figure II.6 et utilisant les lois de la méthodologie bond graph représentées dans le chapitre I. Les équations caractéristiques sont obtenues comme suit :

➤ **Jonction 0 :**

À partir de la figure II.6 on peut déduire les équations de la jonction 0 qui la suivantes :

$$e_1 = e_2 = e_3 \quad (\text{II.17})$$

$$f_2 = f_1 - f_3 \quad (\text{II.18})$$

Les équations des éléments sont données par les équations suivantes :

$$e_2 = U_D = nV_t \ln\left(\frac{f_2}{I_S} + 1\right) \quad (\text{II.19})$$

$$f_1 = I_{ph} \quad (\text{II.20})$$

$$e_3 = f_3 R_{ch} \quad (\text{II.21})$$

➤ **Jonction 1:**

À partir de la figure II.6 on peut déduire les équations de la jonction 1 qui suivent :

$$e_5 = e_3 - e_4 \quad (\text{II.22})$$

$$e_3 = e_4 + e_5 \quad (\text{II.23})$$

$$f_3 = f_4 = f_5 \quad (\text{II.24})$$

Les équations des éléments sont données par les équations suivantes :

$$e_5 = V \quad (\text{II.25})$$

$$e_4 = R_S f_4 \quad (\text{II.26})$$

On utilise les équations (II.17), (II.18), (II.19), (II.6) et (II.22) pour déterminer l'équation de la tension de sortie e_5 , comme suit :

$$e_5 = nV_t \log \left[\left(\frac{f_1 - f_3}{I_{sat}} \right) + 1 \right] - R_S f_4 \quad (\text{II.27})$$

On remplace l'équation (II.21) dans l'équation (II.27) pour développer l'équation de la tension de sortie e_5 , comme suit :

$$e_5 = nV_t \log \left[\left(\frac{f_1 - \frac{1}{R_S} e_3}{I_{sat}} \right) + 1 \right] - R_S f_4 \quad (\text{II.28})$$

En remplaçant l'équation (II.23) dans l'équation (II.28) on aura l'équation de la tension de sortie e_5 , comme suit

$$e_5 = n v_t \log \left[\left(\frac{I_{ph} - \frac{1}{R_S} (e_4 + e_5)}{I_{sat}} \right) + 1 \right] - R_S f_4 \quad (\text{II.29})$$

On remplace l'équation (II.26) dans l'équation (II.29) on aura l'équation finale de la tension de sortie $e_5 = V$, comme suit :

$$V = e_5 = n v_t \log \left[\left(\frac{I_{ph} - \frac{1}{R_S} R_S f_4 - \frac{1}{R_S} e_5}{I_{sat}} \right) + 1 \right] - R_S f_4 \quad (\text{II.30})$$

donc ;

$$V = n v_t \log \left[\left(\frac{I_{ph} - I - \frac{1}{R_S} V}{I_{sat}} \right) + 1 \right] - R_S I \quad (\text{II.31})$$

A partir de cette équation on peut déduire l'équation mathématique du courant en fonction de la tension d'une cellule photovoltaïque à une seule diode sans la résistance shunt, comme suit:

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{R_S I + V}{n v_t} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.32})$$

II.2.2. 3. Modèle mathématique idéal d'une cellule photovoltaïque à une seule diode :

La figure II.8 illustre le circuit électrique équivalent idéal d'une cellule photovoltaïque. Le modèle bond graph de ce circuit électrique est représenté dans la figure II.9, et le bloc diagramme déduit de ce modèle bond graph est représenté dans la figure II.10.

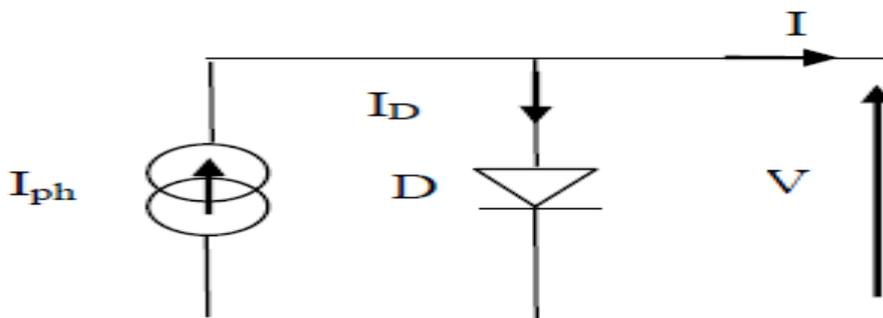


Figure II.8: Schéma électrique équivalent idéal d'une cellule photovoltaïque

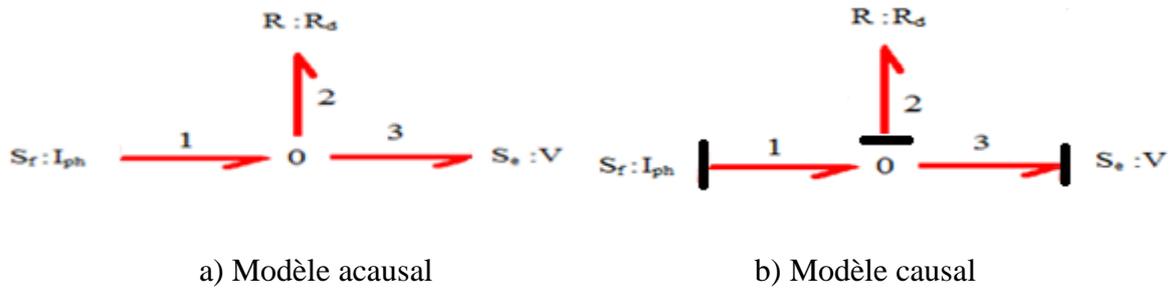


Figure II.9: Modèle bond graph de la figure II.8: a) modèle acausal, et b) modèle causal

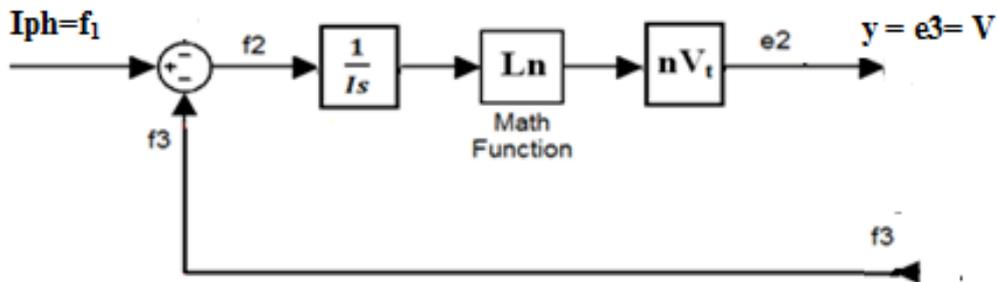


Figure II.10: Bloc diagramme du modèle bond graph représenté dans la figure II.9.

Referons à la figure II.9 et utilisons les lois de la méthodologie bond graph représentés dans le chapitre I. les équations caractéristiques sont obtenues comme suit :

➤ **Jonction 0 :**

À partir de la figure II.9 on peut déduire les équations de la jonction 1 qui la suivent :

$$e_1 = e_2 = e_3 \tag{II.33}$$

$$f_1 = f_2 + f_3 \tag{II.34}$$

Les équations des éléments sont données par les équations suivantes :

$$e_2 = U_D = n V_t \ln \left(\frac{f_2}{I_s} + 1 \right) \tag{II.35}$$

$$f_1 = I_{ph} \tag{II.36}$$

$$e_3 = V \tag{II.37}$$

$$f_2 = f_1 - f_3 \tag{II.38}$$

On remplace l'équation (II.38) dans l'équation (II.35) pour déterminée l'équation de la tension de sortie e_2

$$e_2 = U_D = n V_t \ln \left(\frac{f_1 - f_3}{I_S} + 1 \right) \quad (\text{II.39})$$

On utilise les équations (II.33), (II.36), (II.37) et (II.29) pour déterminé l'équation finale de la tension de sortie $e_2 = e_3 = V$, comme suit :

$$V = n V_t \ln \left(\frac{I_{ph} - f_3}{I_S} + 1 \right) \quad (\text{II.40})$$

A partir de cette l'équation on peut déduire l'équation mathématique du courant en fonction de la tension d'une cellule photovoltaïque à une seule diode sans la résistance shunt et sans la résistance série, comme suit:

$$I = I_{ph} - I_{sat} \left[\exp \left(\frac{V}{nV_t} \right) - 1 \right] \quad (\text{II.41})$$

II.3. Modelé mathématique d'un générateur photovoltaïque

En associant les cellules photovoltaïques en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur photovoltaïque selon les besoins des applications visées (figure II.11)

Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, pour N_s cellules en série, constituant des branches elles-mêmes (N_p) en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur photovoltaïque est donnée par [29] :

$$P_{pv} = N_s \cdot V \cdot N_p \cdot I \quad (\text{II.42})$$



Figure II.11: Un générateur photovoltaïque [22].

II.3.1. Caractéristiques d'un générateur photovoltaïque :

On décrit un générateur photovoltaïque élémentaire par les paramètres suivants [18]:

- **La puissance de crête P_c** : puissance électrique maximum que peut fournir le module dans les conditions standards (25°C et un éclairement de 1000 W/m^2),
- **la tension à vide V_{OC}** : tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement "plein soleil",
- **le courant de court-circuit I_{SC}** : courant débité par un module en court-circuit pour un éclairement " plein soleil ",
- **le point de fonctionnement optimum, (V_{mp}, I_{mp})** : lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = V_{mp} I_{mp}$
- **le rendement** : rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente,
- **le facteur de forme** : rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule.

II.3.2. Protection d'un générateur photovoltaïque (panneau photovoltaïque) :

Lorsque nous concevons une installation photovoltaïque, nous devons assurer la protection électrique de cette installation afin d'augmenter sa durée de vie en évitant notamment des pannes destructrices liées à l'association des cellules et de leurs fonctionnement. Pour cela, deux types de protection sont classiquement utilisés dans les installations actuelles [18]:

- la protection en cas de connexions en parallèle de modules photovoltaïque pour éviter les courants négatifs dans le générateur photovoltaïque (diode anti-retour).
- La protection lors de la mise en série de modules photovoltaïque permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (diode by-pass).

II.3.3. Modèle mathématique d'un générateur photovoltaïque :

Pour un générateur photovoltaïque consiste à N_s cellules photovoltaïques en série et N_p cellules photovoltaïques en parallèle, les relations mathématiques suivant :

$$I_{pv} = N_p I \quad (\text{II.43})$$

$$V_{pv} = N_s V \quad (\text{II.44})$$

$$n_{pv} = n N_s \quad (\text{II.45})$$

$$R_{pv} = R \frac{N_p}{N_s} \quad (\text{II.46})$$

Lorsqu'on remplace les équations précédentes dans l'équation (II.41), on obtient l'équation mathématique du courant en fonction de la tension d'un générateur photovoltaïque, comme suit:

$$I_{pv} = N_p I_{ph} - N_p \cdot I_{sat} \left[\exp\left(\frac{V_{pv}}{N_s V_t}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.47})$$

II.3.4. L'évolution de courant en fonction de la tension d'un générateur photovoltaïque (panneau photovoltaïque) :

Le programme que nous avons développé nous permet de faire varier à volonté les paramètres météorologiques ainsi que les paramètres internes du panneau (facteur d'idéalité de la diode) pour obtenir toutes les propriétés électriques. Les paramètres du panneau utilisé, (panneau de type Isofoton 106 Wc/12 V), dans la simulation sont donnés dans le tableau II.1.

Tableau II.1: Listes des Acronymes et Symboles

Isofoton 106 Wc/12 V	La valeur
La puissance maximale Pmax (W)	106.6
La tension à la puissance maximale Vmax (V)	21.8
Le courant à la puissance maximale Imax (A)	6.54
La tension à circuit ouvert Voc (V)	21.8
Le courant à court-circuit Isc (A)	6.54
Nombre des cellules en séries Ns	2
Nombre des cellules en parallèles Np	36
L'éclairement standard Gref (W/m ²)	1000
Température standard Tref (c°)	25

II.3.4.1. L'évolution de courant et de puissance en fonction de la tension pour les conditions climatiques standards:

La figure II.12 représente les courbes du courant et de la puissance d'un générateur photovoltaïque de type Isofoton 106 Wc/12 V pour les conditions climatiques standards (l'éclairement $G = 1000 \text{ W/m}^2$, la température $T = 25^\circ\text{C}$, la pression $P = 1.751 \text{ AM}$). On remarque que les courbes sont des caractéristiques strictement non linéaires. Ainsi, quand la

tension de panneau photovoltaïque est maximale le courant est minimale (tension en circuit ouvert). En plus, quand le courant de panneau photovoltaïque est maximum la tension est minimale (courant de court-circuit).

Le panneau photovoltaïque atteint la puissance maximale à une tension de 17.9V et que dans les conditions standard de température et d'ensoleillement la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque est optimale

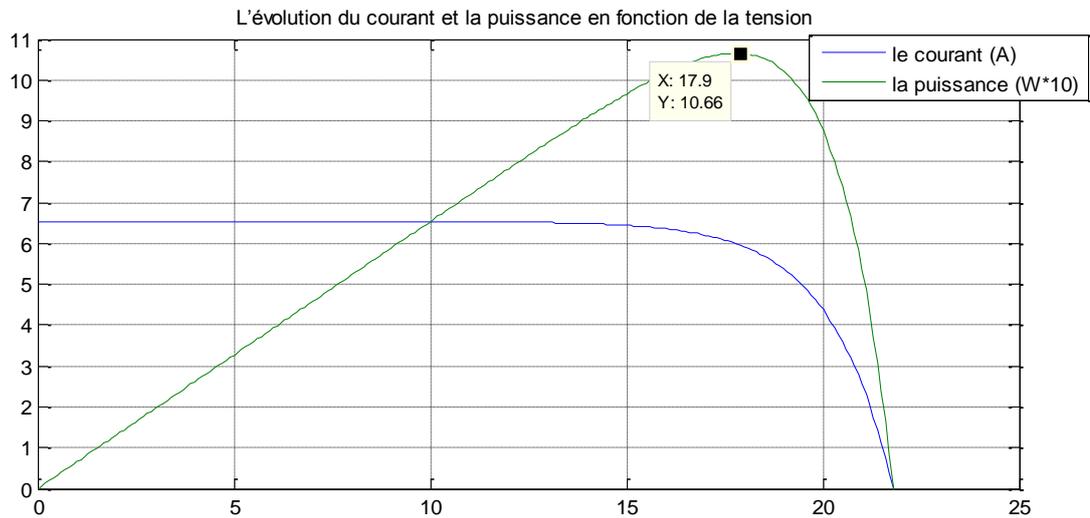


Figure II.12 : Le courant et la puissance d'un générateur photovoltaïque en fonction de la leur tension pour les conditions climatiques standards

II.3.4.2. L'évolution de courant et de puissance en fonction de la tension pour différents conditions climatiques :

Dans cette section, nous présentons l'influence de les différentes conditions climatiques sur les courbes du courant et de la puissance d'un générateur photovoltaïque de type Isofoton 106 Wc/12 V.

II.3.4.2.1. Influence de l'Éclairement :

Figures II.13 et II.14 représentent les courbes du courant et de la puissance d'un générateur photovoltaïque de type Isofoton 106 Wc/12 V en fonction de la tension pour les différents éclairagements à une température standard de 25°C. Les deux figures montrent clairement l'existence de maxima sur les courbes de puissance correspondantes aux Points de puissance maximale P_{max} . Lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'irradiation. Dans un même temps, la tension de circuit ouvert V_{oc} varie très peu.

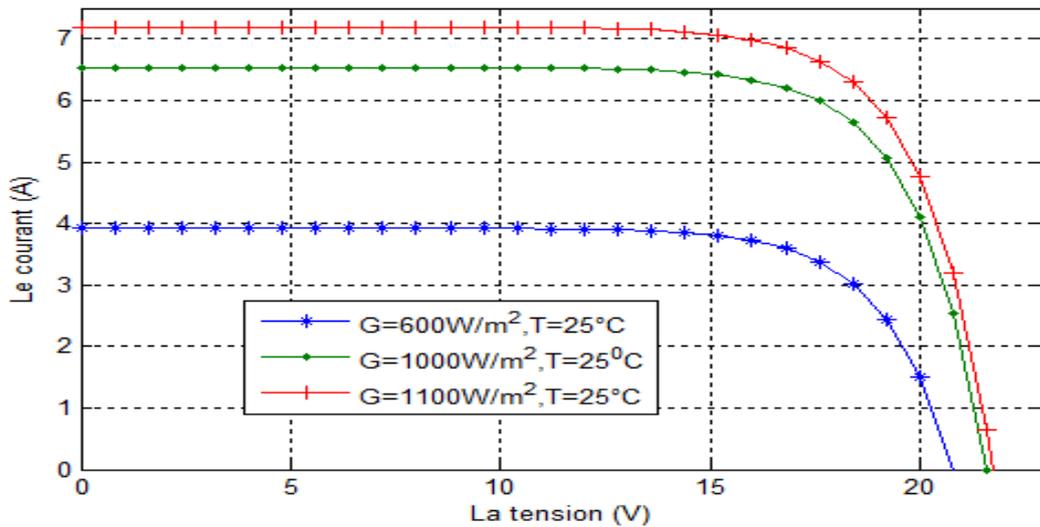


Figure II.13 : Le courant d'un générateur photovoltaïque en fonction de sa tension pour différents éclairagements

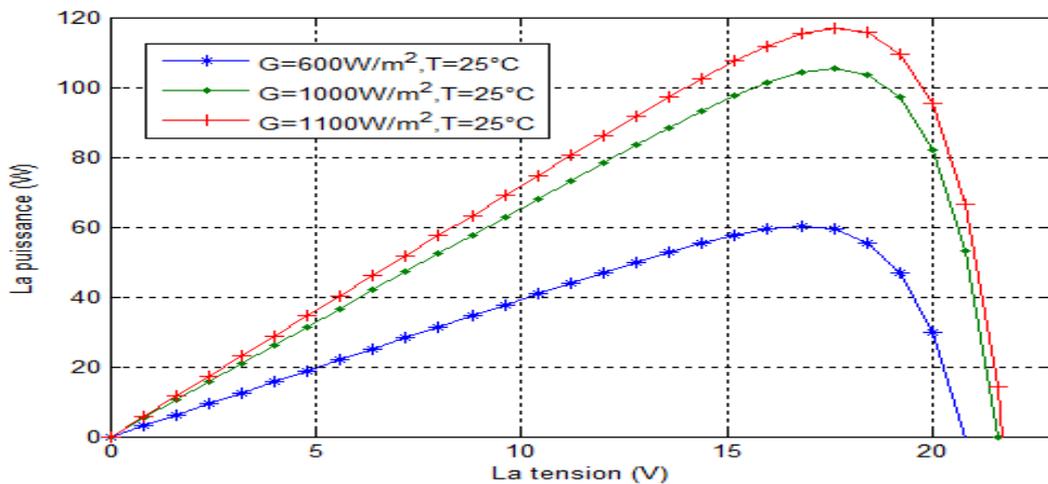


Figure II.14 : La puissance d'un générateur photovoltaïque en fonction de sa tension pour différents éclairagements.

II.3.4.2.2. Influence de la température :

Figures II.15 et II.16 représentent les courbes du courant et de la puissance d'un générateur photovoltaïque de type Isofoton 106 Wc/12 V en fonction de la tension pour les différentes températures à un éclairage standard de 1000W/m^2 .

Figure. II.15 montre que la tension à circuit ouvert de la générateur photovoltaïque augmente avec l'augmentation de la température, par contre, le courant de court-circuit varie très peu avec la température.

On remarque dans La figure II.16 que l'augmentation de la température entraîne :

- une augmentation de la tension de circuit ouvert.
- globalement une augmentation non négligeable de puissance.

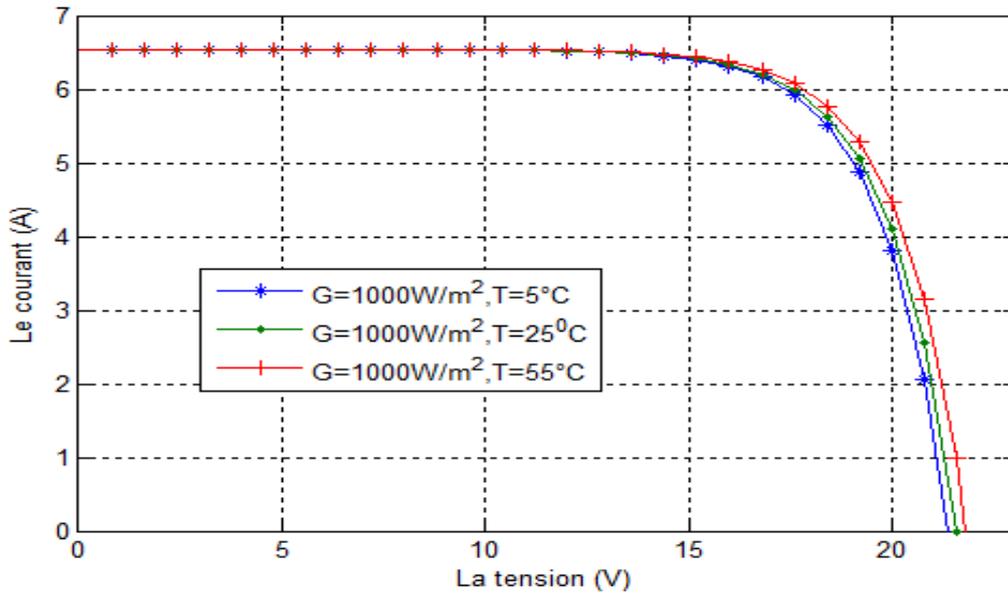


Figure II.15 : Le courant d'un générateur photovoltaïque en fonction de sa tension pour différents température.

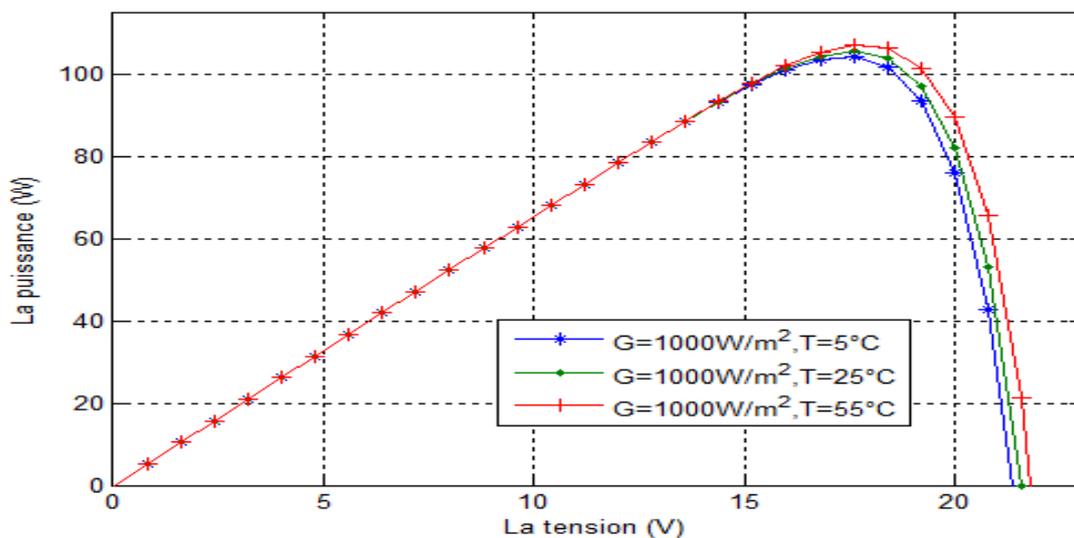


Figure II.16 : La puissance d'un générateur photovoltaïque en fonction de sa tension pour différents température.

II.3.4.2.3. Influence de l'éclairement et la température :

Figures II.17 et II.18 représentent les courbes du courant et de la puissance d'un générateur photovoltaïque de type Isofoton 106 Wc/12 V en fonction de sa tension pour les différentes conditions climatiques. Figure II.17 montre que la variation de la température et de l'éclairement en même temps, nous permet de conclure qu'il y a une petite variation de la tension du circuit-ouvert qui n'est pas remarquable, par contre il y a une grande variation du courant I_{SC} . La figure II.18 montre qu'à chaque fois en augmentant l'irradiation la puissance maximale d'un panneau photovoltaïque augmente.

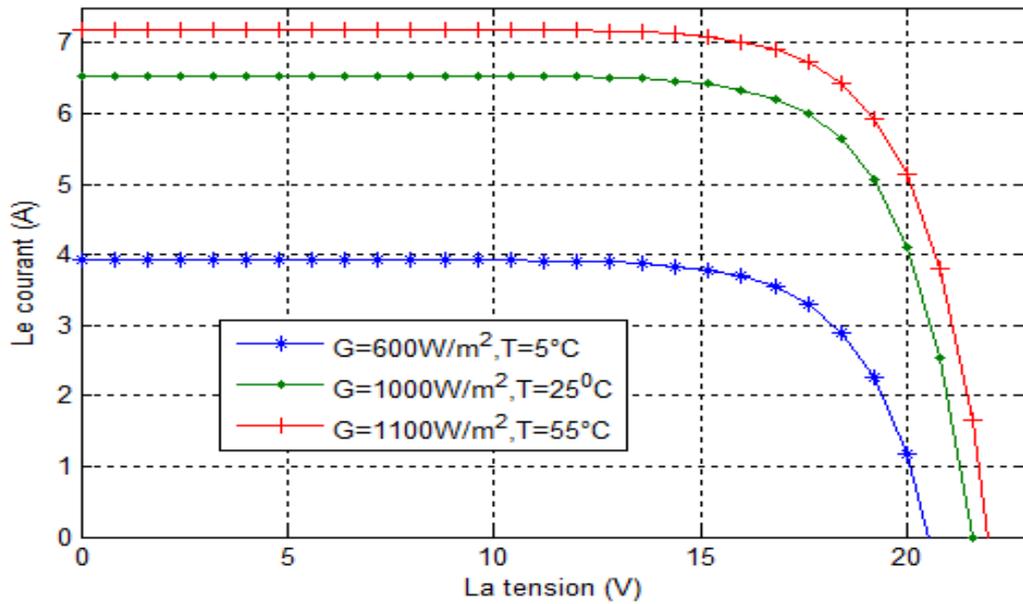


Figure II.17 : Le courant d'un générateur photovoltaïque en fonction de sa tension pour différents éclairagements et température

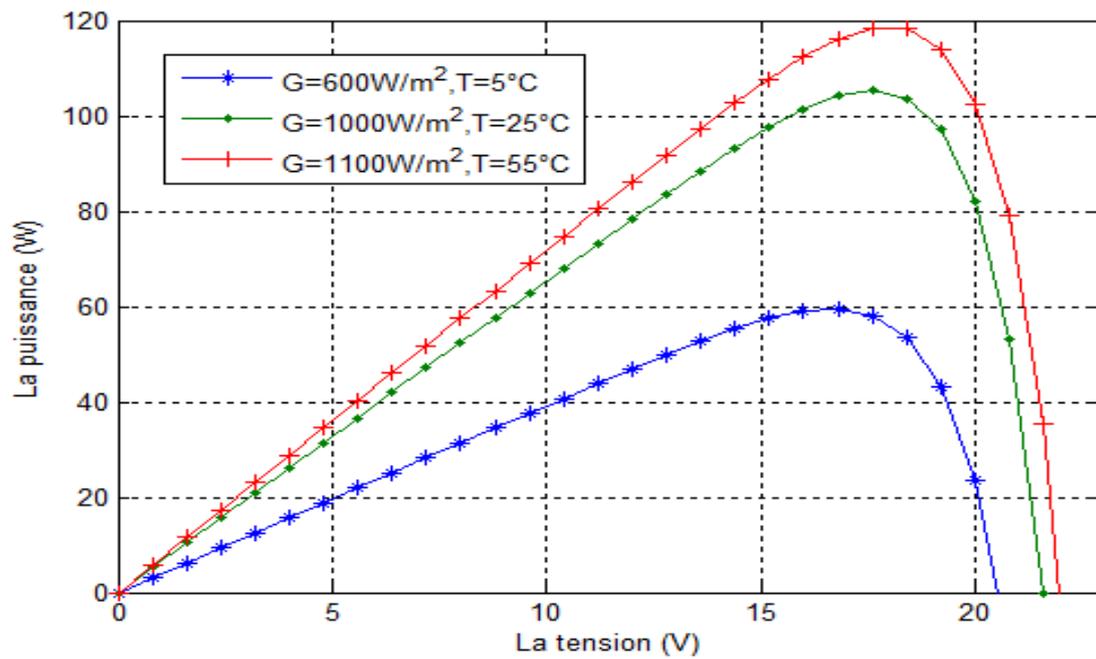


Figure II.18 : La puissance d'un générateur photovoltaïque en fonction de sa tension pour différents éclairagements et température

II.4. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté les principales caractéristiques et les technologiques des éléments constitutifs d'un générateur photovoltaïque et nous avons montré que :

Les principales caractéristiques d'un générateur photovoltaïque de type Isoton 106 Wc/12 V pour les différentes conditions climatiques, montrent que :

- Les courbes du courant et de la puissance d'un générateur photovoltaïque en fonction de son tension sont des caractéristiques strictement non linéaires.
- L'existence de maxima sur les courbes de puissance correspondantes aux Points de puissance maximale P_{\max} .
- Pour une température donnée, le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'irradiation. En plus, la tension du circuit ouvert V_{oc} varie très peu

Chapitre III : Modélisation et simulation d'une centrale photovoltaïque

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats de simulation d'une centrale photovoltaïque de puissance 1MW installée au Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) interconnectée au réseau, les résultats de simulations sont, ensuite interprétés.

La simulation des modèles mathématiques de la centrale photovoltaïque doit permettre de recueillir en sortie du système toutes les caractéristiques électriques de la centrale en introduisant comme paramètres d'entrées un profil des principales grandeurs météorologiques, telles que la température et le rayonnement, données réelles du site de Bouzaréah sur lequel est installé la centrale. Le temps et la tension

III.2. Présentation du site d'Alger (CDER) :

Le Centre de Développement des Energies Renouvelables est un centre de recherche issu de la restructuration de haut-commissariat de la recherche, créé le 22 mars 1988. C'est un établissement public à caractère scientifique et technologique (EPST) chargé d'élaborer et de mettre en œuvre les programmes de recherche et de développement, scientifique, technologique, des systèmes énergétiques exploitant l'énergie, éolienne, géométrique et l'énergie de la biomasse [30] [24].

Le CDER en tant que pôle scientifique, participe activement dans le programme national de recherche et de développement technologique défini par la loi d'orientation et de programme à projection quinquennale sur la recherche scientifique et le développement technologique. Les projets nationaux retenus dans ce programme sont orientés sur des priorités économiques et sociétales pour répondre aux principaux besoins stratégiques de développement économique [23] [24].

Le CDER active depuis sa création de la mise en œuvre de cette stratégie à travers de l'intégration de plusieurs réalisations et projets- pilotes au niveau national. Le CDER grâce à ses chercheurs du siège, de ses trois unités de recherche [23] [30]:

- Unité de développement des équipements solaires (UDES).
- Unité de recherche appliquée en énergies renouvelables(URAER).
- Unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien (URERMS).

Et de sa filiale commerciale ER2 se déploie dans le territoire national comme étant un centre d'excellence en énergies renouvelables à travers ses productions scientifiques et ses innovations au service du secteur socioéconomique au profit des populations [10].

L'installation photovoltaïque du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) à Alger est constituée d'un champ photovoltaïque de 90 modules totalisant une puissance installée de 9,54 kWc sur une surface de 70 m², les modules sont de type Isofoton 106 Wc/12 V (Figure. III.1). Le champ photovoltaïque est partagé en trois sous-champs de 30 modules pour une puissance installée de 3,18 kWc. Chacun est structuré de deux (02) branches parallèles de 15 modules en série. Les sous-champs sont connectés au réseau de distribution à travers trois onduleurs monophasés de type FRONIUS IG30 de 2,5 kW [9].

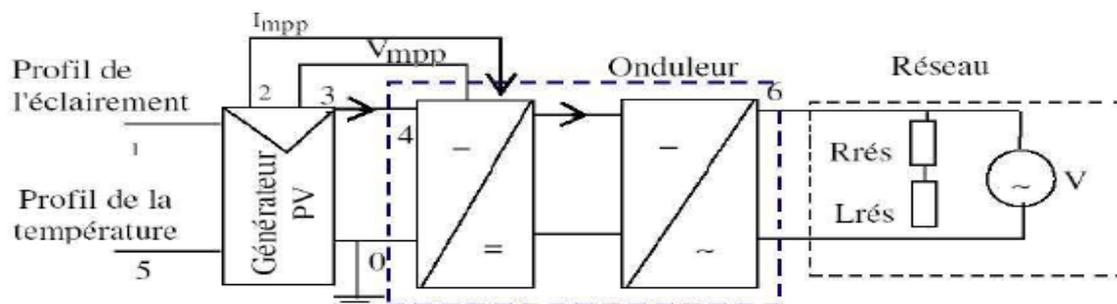


Figure. III.1: Bloc diagramme du modèle comportemental de la centrale [23].

III.3. Les données météorologiques du site d'Alger :

Le tableau III.1 résume les caractéristiques climatiques du site d'Alger (température moyenne et l'irradiation moyenne) pour l'année 2005 :

Tableau III.1: Les caractéristiques climatiques du site d'Alger pour l'année 2005

Moins	T _{moyenne} (°C)	G _{moyenne} (W/m ²)
Janvier	7.97	1025.64
Février	8.48	1018.06
Mars	11.99	1017.79
Avril	14.65	1015.69
May	18.296	1016.11
Juin	23.13	1016.07
Juillet	25.78	1014.61
Août	25.23	1015.43
Septembre	22.50	1017.05

Octobre	20.35	1018.56
Novembre	13.79	1017.69
Décembre	10.86	1020.42

III.4. Simulation d'une centrale PV installé à Alger (CDER) :

Dans cette partie, nous réalisons la simulation d'une centrale photovoltaïque installée à Alger (CDER) dans les caractéristiques climatiques pour l'année 2005 à l'aide du logiciel MATLAB.

La simulation du modèle mathématique de la centrale doit permettre de recueillir en sortie du système toutes les caractéristiques électriques de la centrale en introduisant comme paramètre d'entrées un profil des principales grandeurs météorologiques, telles que la température et le rayonnement, données réelles du site de Bouzaréah sur lequel est installé la centrale [25].

III.4.1. Simulation d'un module photovoltaïque installé à Alger (CDER) :

On utilise le modèle mathématique obtenu au chapitre II et les valeurs mesurées données au tableau III.1 pour obtenir les courbes des courants et les puissances d'un module photovoltaïque de type Isofoton 106 Wc/12 V installée au CDER pour l'année 2005.

Les Figures III.2 et III.3 représentent les courbes du courant en fonction de la tension d'un module photovoltaïque de type Isofoton 106 Wc/12 V installée au CDER pour l'année 2005. Et les Figures III. 4 et III.5 représentent les courbes de la puissance en fonction de la tension d'un module photovoltaïque de type Isofoton 106 Wc/12 V installée au CDER pour l'année 2005. On remarque que la valeur de la puissance d'un module photovoltaïque de type Isofoton 106Wc/12V durant l'année 2005 varie entre 101.8 W et 108.6 W, et le générateur photovoltaïque atteint sa puissance maximale dans le mois de juillet et la puissance minimale dans le mois de février (voir TableauIII.2). Et la variation de la température et de l'éclairement en même temps, nous permet de conclure qu'il y a une petite variation de la tension du circuit-ouvert.

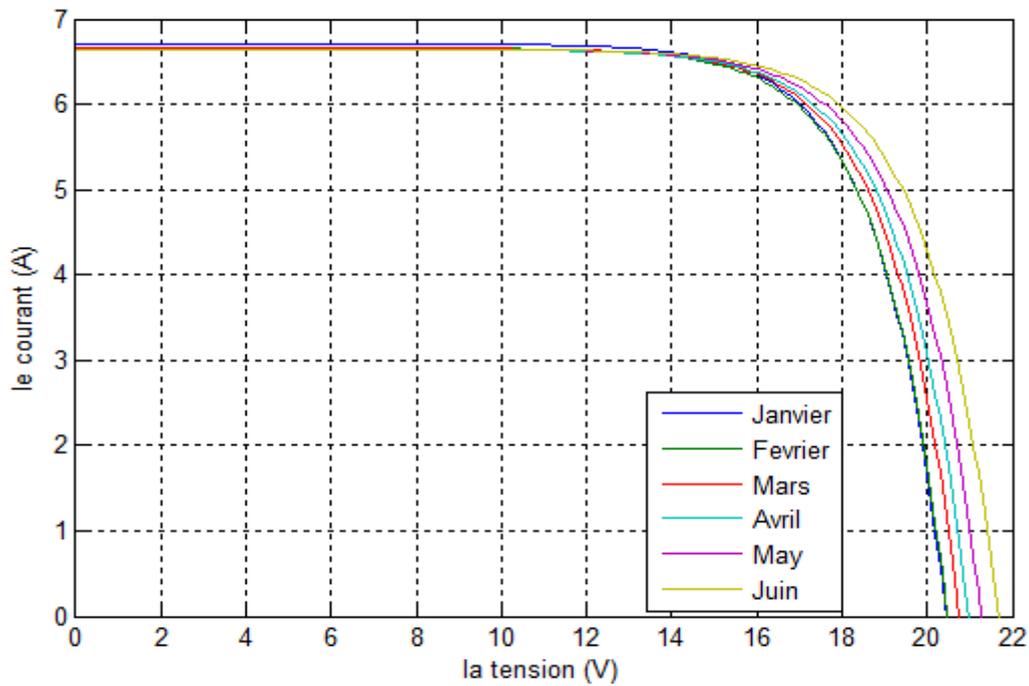


Figure. III.2: Le courant en fonction de la tension d'un module photovoltaïque de type Isofoton 106 Wc/12 V du janvier au juin.

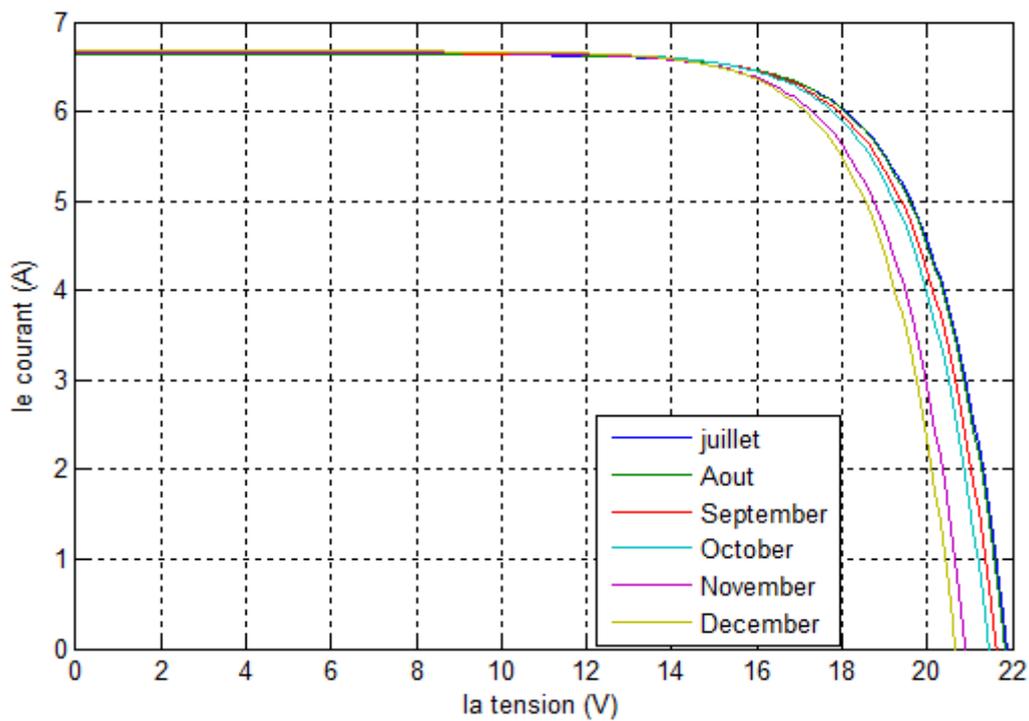


Figure. III.3: Le courant en fonction de la tension d'un module photovoltaïque de type Isofoton 106 Wc/12 V du juillet au décembre.

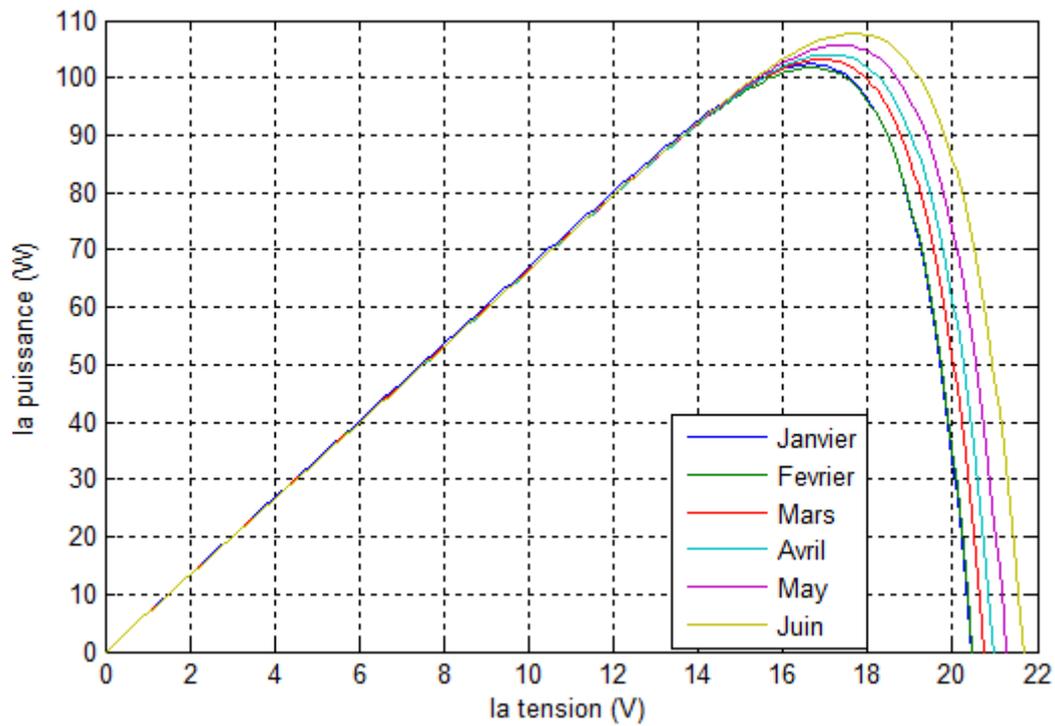


Figure. III.4: La puissance en fonction de la tension d'un module photovoltaïque de type Isofoton 106 Wc/12 V du janvier au juin.

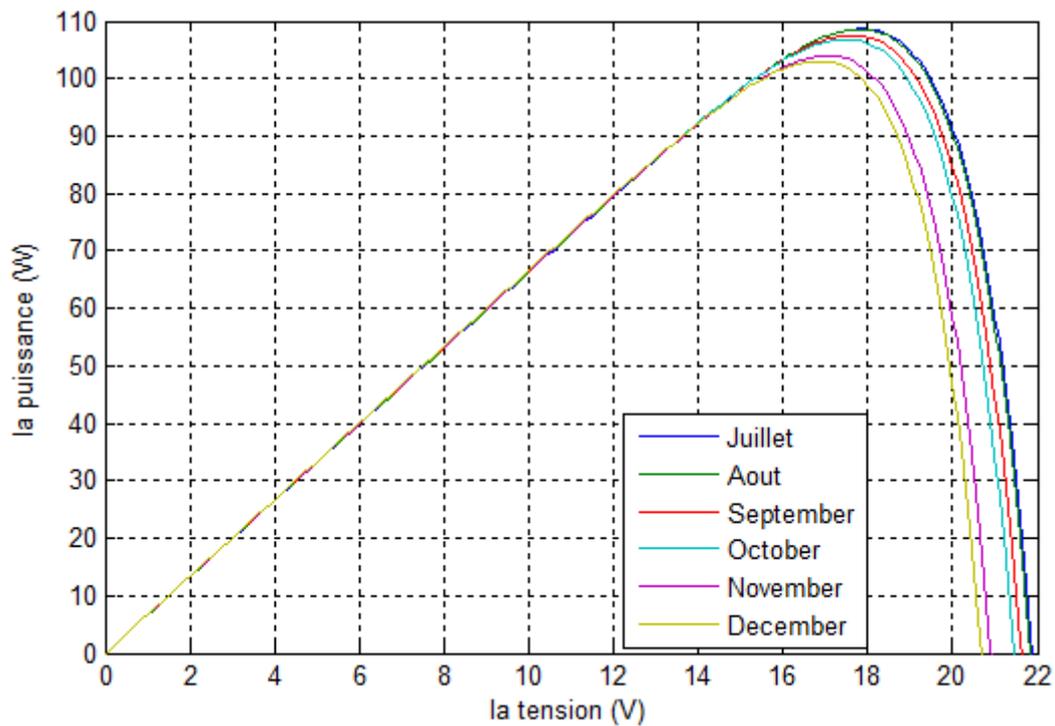


Figure. III.5: La puissance en fonction de la tension d'un module photovoltaïque de type Isofoton 106 Wc/12 V du juillet au décembre.

Tableau III.2 résume la puissance maximale calculée et son correspondant courant et voltage d'un module photovoltaïque de type Isofoton 106 Wc/12 V pour l'année 2005.

Tableau III.2 la puissance maximale calculée et son correspondant courant et voltage d'un module photovoltaïque de type Isofoton 106 Wc/12 V pour l'année 2005.

Moins	$V_{P_{max}}$ (V)	$I_{P_{max}}$ (A)	P_{max} (W)
Janvier	16.6	6.168	102.4
Février	16.7	6.095	101.8
Mars	16.9	6.106	103.2
Avril	17.1	6.087	104.1
May	17.5	6.034	105.6
Juin	17.7	6.084	107.7
Juillet	18	6.033	108.6
Août	17.9	6.061	108.5
Septembre	17.8	6.039	107.5
Octobre	17.6	6.068	106.8
Novembre	17.2	6.040	103.9
Décembre	17	6.058	103

III.4. 2 Le générateur photovoltaïque installé à Alger (CDER) :

Le générateur photovoltaïque est formé de 90 modules monocristallins. Ces modules sont répartis en trois champs de 30 modules orientés de 10° sud-ouest avec une inclinaison de 25° par rapport au plan horizontal.

Chaque module est constitué de 36 cellules PV connectées en série et deux branches parallèles.

La puissance de chaque champ de 30 modules est donc 3180 Wc et la puissance maximale totale de la centrale sera égale à 9540 Wc.

Les figures III.6 et III.7 montrent le générateur photovoltaïque réparti sur trois champs installés sur le toit du Centre de Développement des Energies Renouvelables [24] [9].



Figure III.6 : Installation du générateur photovoltaïque sur le toit de CDER [24].

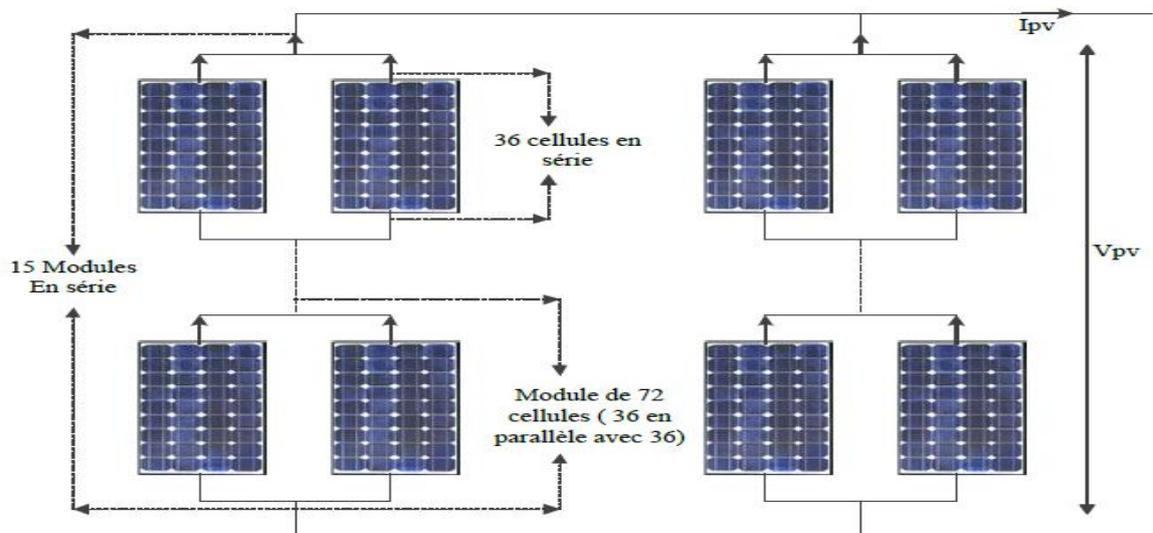


Figure III.7 : Schéma d'une partie de la centrale de production d'électricité d'un système photovoltaïque installé au CDER[24].

Figure III.8 représente les courbes du courant et de la puissance d'un générateur photovoltaïque (sous-champs photovoltaïque de l'installation) en fonction de leur tension pour les conditions climatiques standards (l'éclairement $G = 1000 \text{ W/m}^2$, la température $T = 25^\circ\text{C}$, la pression $P = 1.751 \text{ AM}$). Où, la puissance maximale est de 3.157 KW à tension de 260 V et à courant égale à 12.14 A . Par conséquent, la puissance maximale totale de la centrale photovoltaïque installée à Alger (CDER) est égale à 9.471 KW .

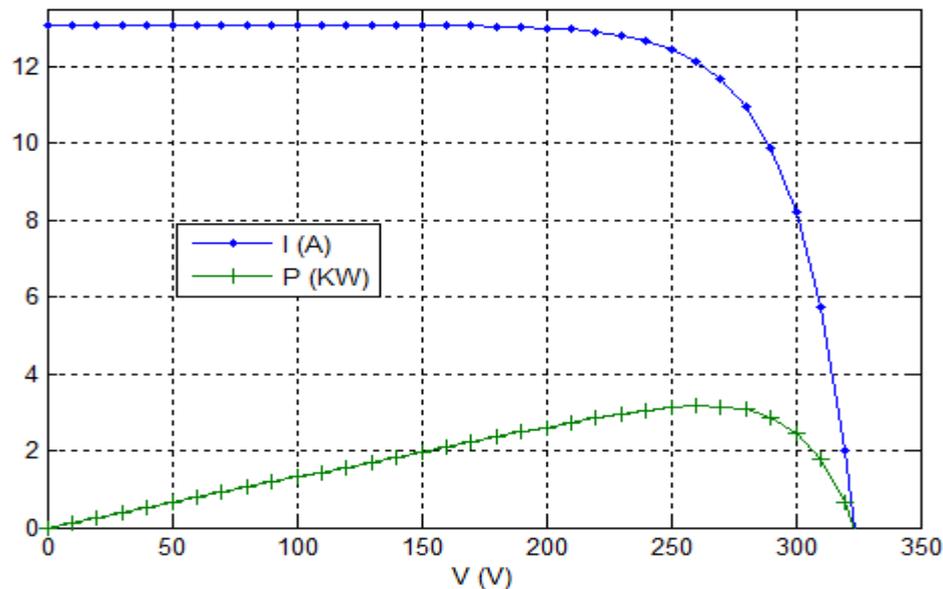


Figure III.8 : Le courant et la puissance d'un générateur photovoltaïque (sous-champsphotovoltaïque de l'installation) en fonction de leur tension pour les conditions climatiques standards.

III.4.3. Simulation d'un générateur PV installé à Alger (CDER) :

Dans cette partie, on réalise la simulation d'un générateur photovoltaïque installé à Alger (CDER) dans les caractéristiques climatiques pour l'année 2005 à l'aide du logiciel MATLAB.

III.4.3.1. L'évolution de la puissance en fonction de la tension :

Les Figures III. 9 représentent la courbe de la puissance en fonction de la tension d'un générateur photovoltaïque de type Isofoton 106 Wc/12 V installée au CDER pour les conditions climatiques de l'année 2005. Figure III.9 montre que la puissance maximale produite en juillet par le générateur photovoltaïque installé à Alger est 3.2 kW.

III.3.4.2. L'évolution de courant en fonction de la tension :

Les Figures III. 10 représentent la courbe du courant en fonction de la tension d'un générateur photovoltaïque de type Isofoton 106 Wc/12 V installé au CDER pour les conditions climatiques de l'année 2005. Figures III.10 : montre que le changement des conditions climatiques (température et de l'éclairement) en même temps, nous permet de conclure qu'il y a une grande variation de la tension du circuit-ouvert et une petite variation négligeable de la tension du court-circuit.

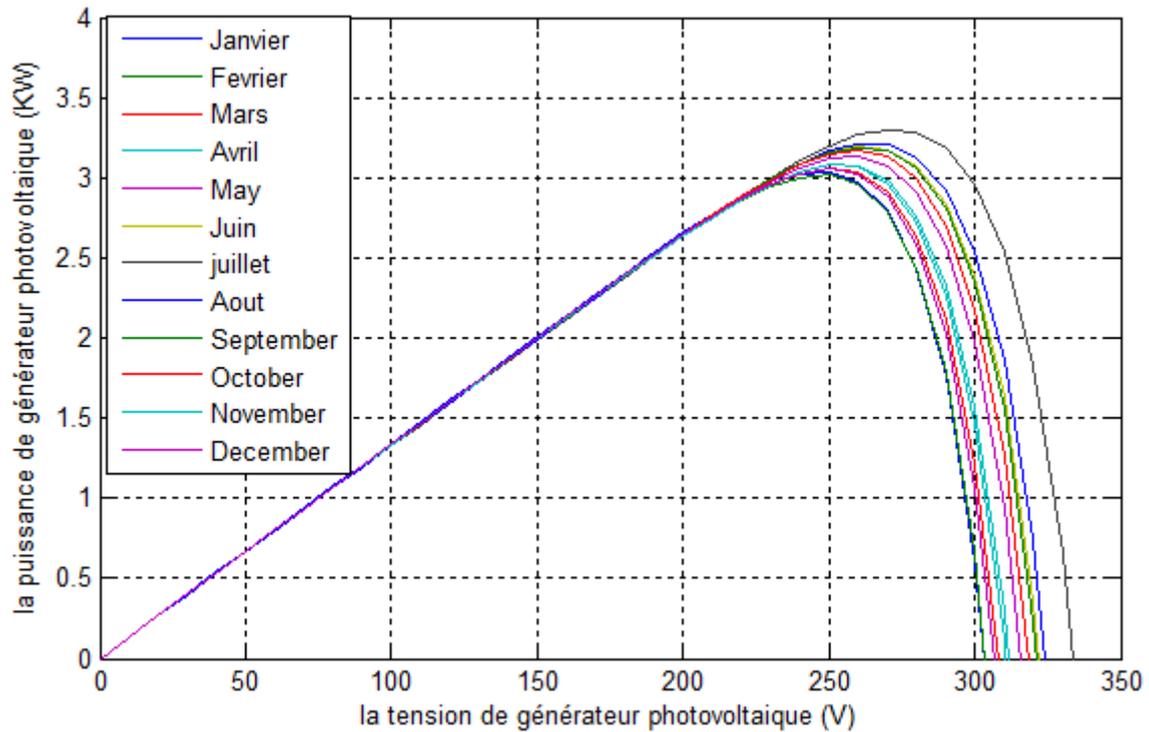


Figure III.9: La puissance d'un générateur photovoltaïque en fonction de sa tension pour les conditions climatiques de l'année 2005.

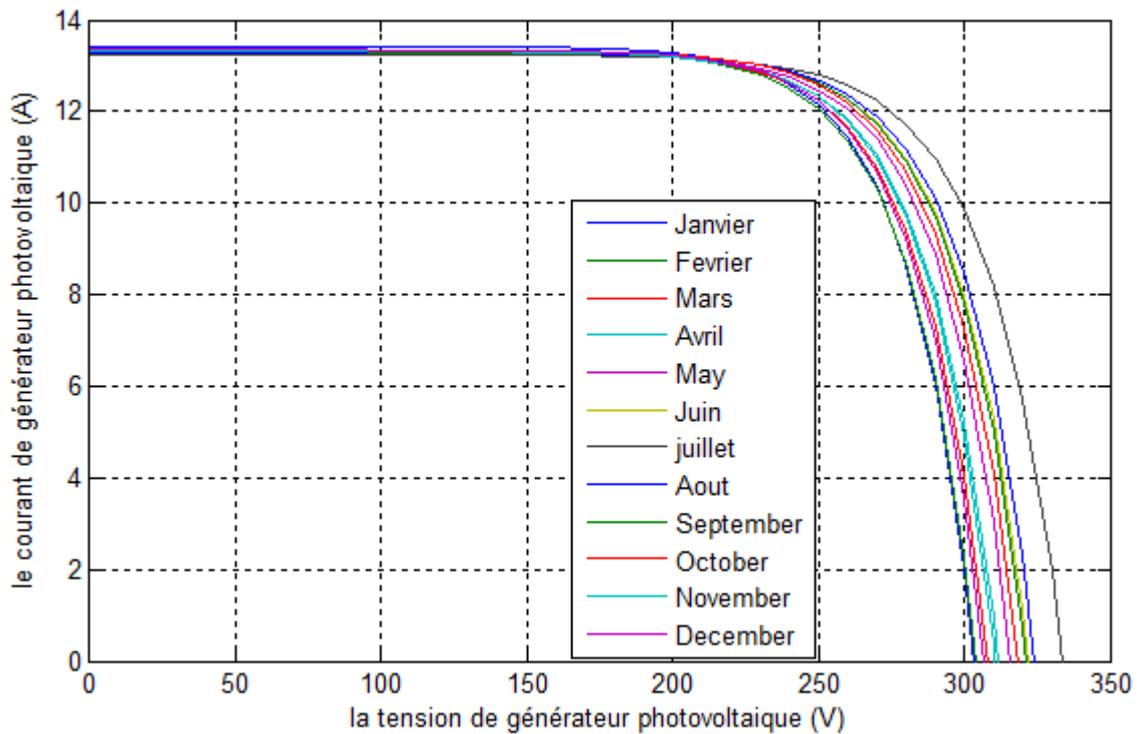


Figure III.10: Le courant d'un générateur photovoltaïque en fonction de sa tension pour les conditions climatiques de l'année 2005

III.5.les convertisseurs :

Les convertisseurs d'électronique de puissance sont amenés à jouer un rôle de plus en plus important dans les réseaux électriques. Ils sont devenus des éléments incontournables pour la connexion des énergies renouvelables [20].

III.5.1. La technologie des onduleurs couplés au réseau :

L'onduleur couplé au réseau est utilisé pour les installations photovoltaïques. Il permet de transformer le courant continu, produit par les modules solaires, en un courant ondulé conforme à celui du réseau. Il adapte également le courant produit à la fréquence et à la tension du réseau. Dans les installations d'habitation, le courant solaire produit est d'abord utilisé par l'habitation elle-même, si le courant produit pour l'habitation est excédentaire, l'excédent est injecté dans le réseau [19].

III.5.2. Système PV connecté au réseau [23] :

Les convertisseurs de puissance hacheur et onduleur sont implantés pour ces raisons :

- Forcer le générateur photovoltaïque à fonctionner au point de puissance maximale.
- Produire le courant de sortie I_{ac} sinusoïdale et en phase avec la tension du réseau.
- Conversion de puissance avec un rendement η plus proche de 100%.
- Fournir l'énergie stockée pour équilibrer la différence entre $P_{ac} = P_{pv}$ et $P_{ac}(t)$

Chaque sous-champ dans Le système photovoltaïque installé à Alger est connecté au réseau électrique à travers des convertisseurs de puissance survolteur DC/DC et d'un onduleur DC/AC (voir Figure III.11).

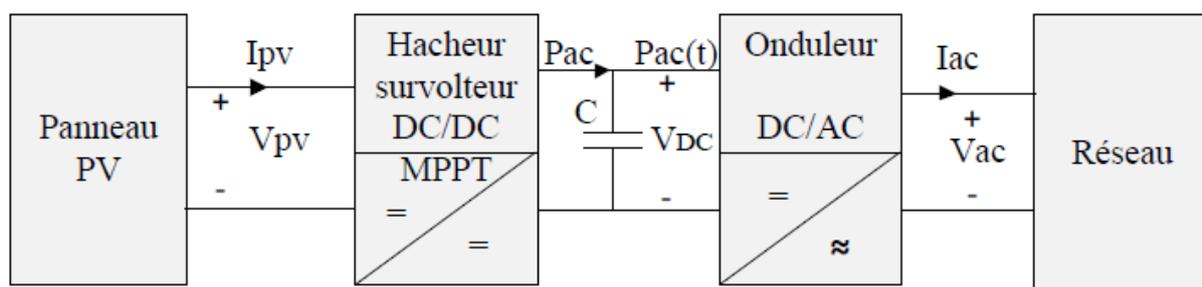


Figure III.11 : Système photovoltaïque connecté au réseau électrique [24].

III.5.3. Le convertisseur continu –continu (convertisseur boost) DC /DC :

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ photovoltaïque correspondant au point de puissance maximal.

Ce système d'adaptation est couramment appelé MPPT (maximum power point tracking). Son rendement se situe entre 90 et 95% [6].

On utilise un convertisseur boost lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue. Les systèmes alimentés par photovoltaïque utilisent souvent plusieurs cellules en série afin de disposer d'un niveau de tension suffisamment élevé. Un convertisseur boost permet d'augmenter la tension fournie par la cellule photovoltaïque et ainsi diminuer le nombre de cellules nécessaires pour atteindre le niveau de tension désiré [23].

Ce système présente deux inconvénients pour un photovoltaïque de faible puissance [6]:

- Prix élevé.
- Le gain énergétique annuel par rapport à un système moins complexe (cas d'une régulation de la tension n'est pas important.)

III.5.3.1. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'un convertisseur boost peut être divisé en deux phases distinctes [26] :

- Une phase d'accumulation d'énergie : lorsque le Mosfet est fermé (état passant), cela entraîne l'augmentation du courant dans l'inductance donc le stockage d'une quantité d'énergie sous forme d'énergie magnétique. La diode D est alors bloquée et la charge est ensuite déconnectée de l'alimentation.
- Lorsque le MOSFET est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.é.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode D, le condensateur C et la charge R. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité.

III.5.4. La convertisseur continu-alternatif DC/AC:

Un convertisseur DC/AC (onduleur de tension) est essentiellement utilisé pour fournir une tension ou un courant alternatif afin d'assurer l'alimentation en énergie des charges critiques (micro-ordinateur, station de télécommunication...) pendant la coupure du réseau électrique ou une alimentation permanente pour les systèmes autonomes (centrales photovoltaïques, engins aérospatiaux,...) [29]

III.5.4.1. Principe de fonctionnement :

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant continu, produit par le générateur solaire, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Une deuxième fonction de l'onduleur est d'adapter le point de fonctionnement (courant-tension) au générateur, il réalise un transfert optimal de puissance entre le générateur photovoltaïque et la charge, sous

les conditions climatiques variables. Ce transfert est contrôlé par un circuit de génération des signaux PWM qui commande la variation de la fréquence d'alimentation [18].

III.5.4.2. approche bond-graph de convertisseur [27]:

Dans cette partie, l'application de la méthodologie bond graph sur un onduleur sera effectuée à l'aide de la référence [27], donc les équations de l'onduleur sont comme suit:

$$V_{out} = (p - \sin(I_{out}) \cdot p_m) \cdot V_{in} \text{ (III.1)}$$

$$I_{out} = (p - \sin(I_{out}) \cdot p_m) \cdot I_{in} \text{ (III.2)}$$

Le modèle bond graph d'un onduleur représenté dans la figure III.12.

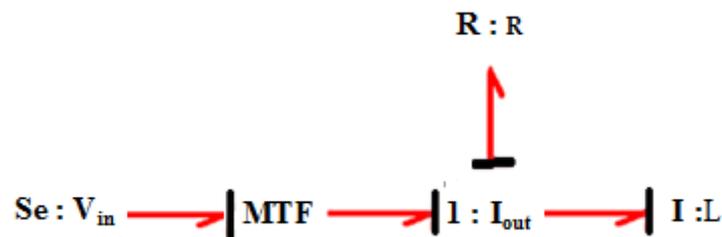


Figure III.12 : Model bond graph d'un convertisseur [29].

III.5.4.3. simulation de l'onduleur :

Les figures III.13 et III.14 présente les courbes de la tension en fonction du temps d'un onduleur triphasé installé au CDER. On remarque que la tension de sortie de l'onduleur atteint une valeur de 2.5 KV et sa forme a été changée d'une forme continue à une forme alternative.

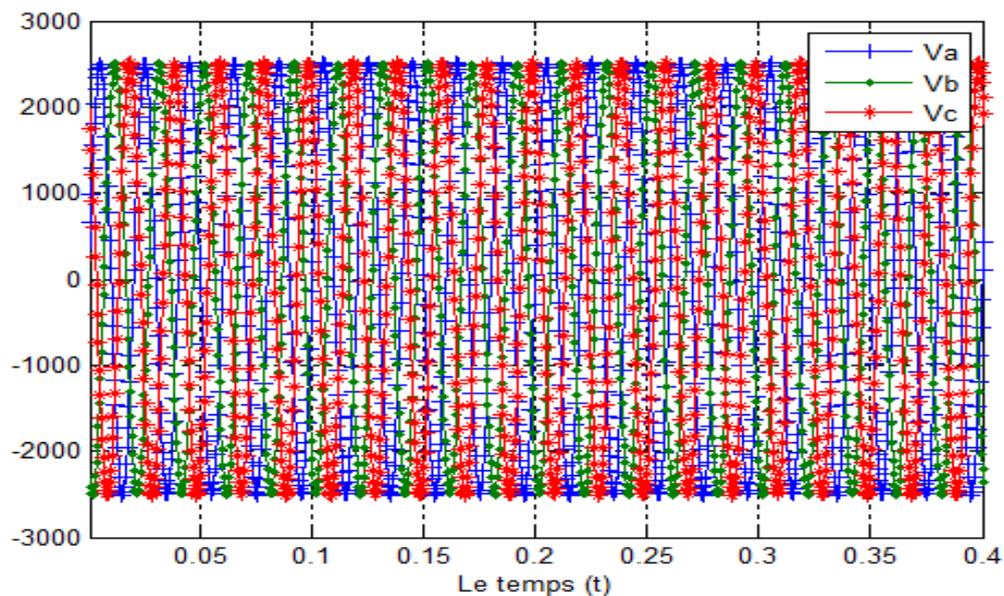


Figure. III.13: La tension d'une centrale photovoltaïque installée à Alger (CDER).

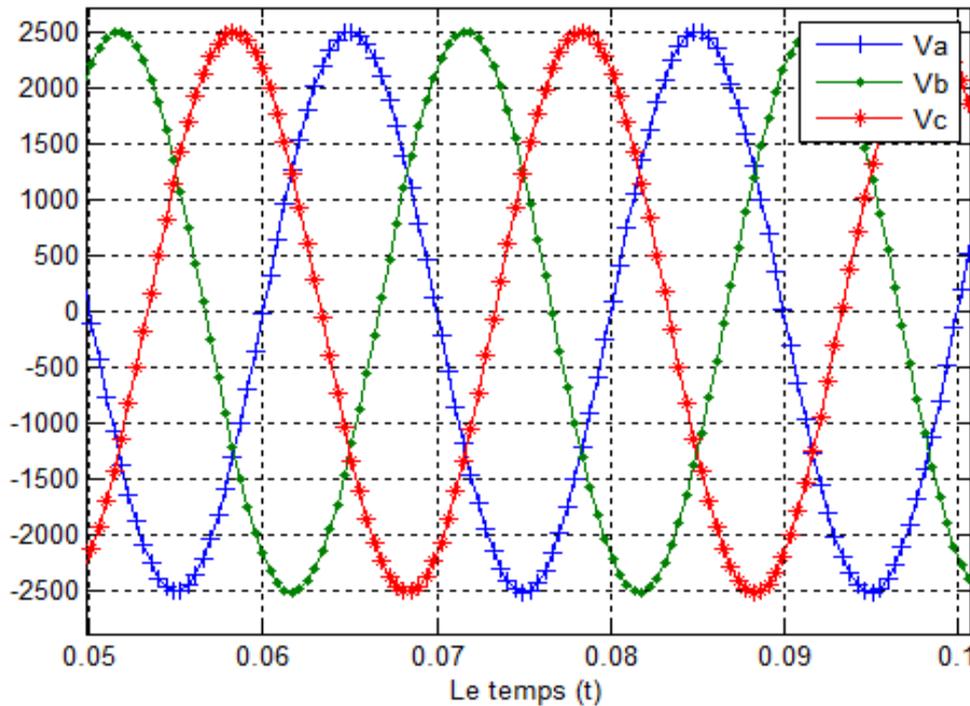


Figure. III.14: La tension d'une centrale photovoltaïque installée à Alger (CDER).

III.6. Conclusion

Cette étude nous a permis de faire une évaluation qualitative du système bond graph qui permet de simuler un tel système avec une prise en compte de tous les aspects: pertes, emplacement géographique, ombrage,...etc. Ceci a permis de faire une meilleure estimation des pertes qui peuvent affecter le rendement global.

Le fonctionnement du générateur photovoltaïque à un rendement optimal nécessitant l'insertion des convertisseurs statiques (hacheur) entre le générateur et le récepteur (charge) à une tension constante peut être optimisé en ajustant le rapport cyclique α . Cependant, la connexion avec le réseau nécessite un convertisseur de type onduleur.

Conclusion Générale:

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et de développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches ont conduit à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce qui explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde.

Ce travail s'agit d'une contribution à l'optimisation du fonctionnement d'un système photovoltaïque. Le travail présenté dans ce mémoire traite l'étude par une approche bond graph d'une classe de systèmes photovoltaïque. Cette étude concerne la modélisation et la simulation d'une centrale photovoltaïque installée à CDER (Centre de Développement des Énergies Renouvelables) à Bouzaréah, Alger. Ce travail a donc porté sur la modélisation et la simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique moyennant le logiciel MATLAB (Simulink).

La modélisation des éléments d'un système photovoltaïque est une étape indispensable qui doit précéder toute application de dimensionnement, d'identification ou de simulation. Cependant, ces systèmes photovoltaïques sont de type hybride et leur modélisation basée sur une technique graphique dite bond graph. Cette technique est complètement systématique et a une flexibilité suffisante pour pouvoir introduire les différents composants dans le système. Elle est constituée de neuf éléments de base avec deux détecteurs, et elle est basée sur le circuit électrique équivalent et la présentation graphique.

Les principales caractéristiques d'un générateur photovoltaïque de type Isofoton 106 Wc/12 V pour les différentes conditions climatiques, montrent que :

- (i) Les courbes du courant et de la puissance d'un générateur photovoltaïque en fonction de son tension sont des caractéristiques strictement non linéaires.
- (ii) L'existence de maxima sur les courbes de puissance correspondantes aux Points de puissance maximale P_{max} .
- (iii) Pour une température donnée, le courant de court-circuit I_{cc} varie proportionnellement à l'irradiation. En plus, la tension du circuit ouvert V_{oc} varie très peu.

Le fonctionnement du générateur photovoltaïque à un rendement optimal nécessite l'insertion des convertisseurs statiques (hacheur) entre le générateur et le récepteur (charge) à une tension constante peut être optimisé en ajustant le rapport cyclique α . Cependant, la connexion avec le réseau nécessite un convertisseur de type onduleur.

Résumé

Résumé :

Ce travail est pour la modélisation et l'analyse d'une centrale photovoltaïque installée à Alger.

Donc la modélisation est basée sur la méthodologie bond graph. Ou cette technique est basée sur les neuf éléments et le circuit équivalent d'un système étudié.

Puisque la centrale photovoltaïque contient un générateur photovoltaïque connecté au réseau de senelgaze à travers des onduleurs. Donc l'analyse de ce centrale photovoltaïque est commencée par l'analyse d'un module photovoltaïque, ensuite l'analyse d'un générateur, et après l'analyse d'un onduleur.

Pour le module et le générateur photovoltaïque, il y a deux parties de la simulation : la première partie c'est pour les conditions climatiques standards pour assurer l'efficacité du modèle mathématique obtenu, et la deuxième partie c'est pour les conditions climatiques mesurées à CDER Abstract.

This work is for the modeling and analysis of a photovoltaic plant installed in Algiers

So modeling is based on the bond graph methodology. Or this technique is based on the new elements and the equivalent circuit of a system studied.

Since the photovoltaic plant contains a photovoltaic generator connected to senelgaze network through inverters. Therefore the analysis of this photovoltaic plant is started by the analysis of a photovoltaic module, then the analysis of a generator, and after analysis of an inverter

For the module and the PV generator, there are two parts of the simulation: the first part is for standard climatic conditions to ensure the effectiveness of the resulting mathematical model, and the second part is for the measured weather to CDER

Résumé

ملخص

هذا العمل هو لنمذجة وتحليل مصنع الضوئية المثبتة في الجزائر

لذلك يقوم النمذجة على منهجية الرسم البياني السندات. أو هذه التقنية تعتمد على عناصر جديدة والدائرة المكافئة للنظام دراستها

الشبكة من خلال المحولات. ولذلك بدأ senelgaze منذ المصنع الضوئية يحتوي على مولد الضوئية المتصلة تحليل هذه المحطة الضوئية من خلال تحليل من وحدة نمطية الضوئية، ثم تحليل مولد، وبعد تحليل العاكس

، هناك نوعان من أجزاء من المحاكاة: الجزء الأول هو عن الظروف المناخية القياسية لضمان PV لوحدة ومولد ،فعالية النموذج الرياضي الناتج، والجزء الثاني هو لمعرفة حالة الطقس المقاس إلى النجاعة الطاقية

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] M.Batoul ikram, B.Mustapha, *Modélisation et détection des défauts par bond graph, application à un banc de régulation de niveau*, 09 octobre 2013.
 - [2] A.Mukherjee, R.karmakar, A.k.samantary, *Bond graph in modeling, simulation and fault identification*, 2006.
 - [3] W.el osta, *Surveillabilité structurelle et platitude pour le diagnostic des modèles bond graph couplés*, 06/12/2005.
 - [4] J.granda, *Automated modeling and simulation using the bond graph method for the aerospace industry*.
 - [5] A. Merabtine, *Modélisation bond graph en vue de l'efficacité énergétique du bâtiment*, nancy le 19/11/2012.
 - [6] Pieter j. mosterman, *A hybrid bond graph modeling paradigm and its application in diagnosis*, may 1997.
 - [7] G. gandanegara, *Méthodologie de conception systémique en génie électrique à l'aide de l'outil bond graph : application à une chaîne de traction ferroviaire*, 7/11/2003.
 - [8] B. Abdelkader, *Modélisation et diagnostic d'un onduleur triphasé par l'approche bond-graph*, 02/12/2009.
 - [9] Javier a.kypuros, *System dynamics and control with bond graph modeling*. 06/09/2006
 - [10] W. Borutzky, *Bond graph methodology, development and analysis of multidisciplinary dynamic system models* , london 2010.
 - [11] A.k.samantaray, B. ould bouamama, *Model-based process supervision a bond graph approach*, london 2008.
 - [12] G. Dauphin-tanguy, B. ould bouamama, c. Sueur, a. Rahmani, *Les bonds graphs pour: la modélisation, la commande et la surveillance*, 16/10/2011.
 - [13] Ph. Fichou, *Bond graphs : une méthode pluridisciplinaire*, septembre-octobre 2004.
 - [14] A. Lyes, *Etude de la connexion au réseau électrique d'une centrale photovoltaïque*, 05/05/2011
 - [15] F. lasnier, *Photovoltaic engineering handbook*, 21/07/2012.
 - [16] M. Lakhdar louazene, *Etude technico-économique d'un système de pompage Photovoltaïque sur le site d'Ouargla*, 12/06/2008.
-

Références bibliographiques

- [17] C. Bernard, C. Sebrao – olivera, B. Laval, C. Vaudouer, *Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue*, 2009.
 - [18] B. Djamil, *Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque applicatiou au pompage*, 28 / 11 / 2007.
 - [19] aoufi saliha, *Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque*, 28/09/2014.
 - [20] belhadj mohammed, *Modélisation d'un système de captage autonome*, 2007/2008.
 - [21] a.saadi, *Etude comparative entre les techniques d'optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque*, 05/05/2011.
 - [22] E. Mansour, *Modélisation des panneaux photovoltaïques sur compact rio*, 2012.
 - [23] M. lakhdar louazene, *Contribution à l'optimisation des systèmes Photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes – Application zone de Ouargla*, 22/10/2015.
 - [24] M. slama fateh, *Modélisation d'un système multi générateurs photovoltaïques Interconnectés au réseau électrique*, 01 /04/2011.
 - [25] A. Karima, *Contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (IMW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension*, 2014/2015.
 - [26] Etude comparative de simulation entre PVsyst3 et PSpice de la centrale photovoltaïque connectée au réseau du Centre de Développement des Energies Renouvelables, B.P.62, Route de l'Observatoire, Bouzaréah, Alger, Algérie.
 - [27] D.mezghanni ,r.andoulsi ,a.mami ,g.dauphin-tanguy, *Bond graphe modelling of a Photovoltaic system feeding an induction motor –pump*, 23/08/2007.
 - [28] M^{elle} brihmat fouzia, *L'étude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride pv/éolien*, 03/07/2012.
 - [29] B. Ngueoueuele Yannick, *Modélisation des injections de puissance d'un système pv sur un réseau public, mémoire pour l'obtention de master en ingénierie de l'eau et de L'environnement*, 26/07/2012.
 - [30] Melle. ATMANIA Hanane, *La stratégie d'implantation des énergies renouvelables en Algérie cas de la photovoltaïque*, 15 janvier 2015.
-