

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique
Université A.MIRA BEJAIA



Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

En vue de l'obtention du diplôme de MASTER en Electrotechnique

Option : Energies Renouvelables

Thème :

Méthodes d'identification des
Panneaux photovoltaïques

Présenté par :

M^r SAADA Nassim
M^r OUAZAR Abdellah

Encadré par :

M^r : S. HADJI

Promotion : 2014/2015

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier éternellement Allah le tout puissant de nous avoir donné le courage et la volonté de mener a terme ce modeste travail.

Nous remercions Très sincèrement Mr. S. Hadji notre promoteur de ce travail, pour ses conseils pertinents, et ses orientations judicieuses sa patience et diligence, et par ses suggestions a grandement facilité ce travail.

.Nous tenons à exprimer notre gratitude aux membres de jury qui ont bien voulu examiner ce travail.

Nous remercions vivement tous les enseignants et tous ceux à qui nous devons notre formation.

Nous remercions vivement toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin, à la réalisation de ce modeste travail

SAADA Nassim



OUAZAR Abdellah

Dédicace

Après de longues années d'études et de travail, sachant l'importance de l'aide des êtres qui m'aiment, je voudrai humblement leurs, dédier ce modeste travail tout en sachant qu'ils méritent le meilleur qui soit.

Je dédie ce travail :

*À mes chers parents que dieu les garde et les protège
Qui on fait tant de sacrifice pour m'élever et m'instruire et qui mon encourage tout le long de mon parcours scolaire et académique.*

À mes frères

Adel, Fouad

Et mes Sœurs, qui m'ont soutenu surtout sur le plan moral.

À ma grande mère

Qui repose en paix et que dieu lui accorde sont vaste paradis.

À mon Fidel amis et binôme OUAZAR Abdellah.

A ma Fidel Amie Adjou ZOULIKHA

Qui ma soutenu autant qu'elle a pu.

À mes chers enseignants qui mont dirigé et aider et surtout soutenu.

À tous mes amis et camarade d'études et tout le groupe Energie Renouvelable.

Et mes amis et mes copains de chambre B11.

*Aux étudiants de génie électrique et toute la promotion
2014/2015*

Nassim SAADA

Dédicace

Après de longues années d'études et de travail, sachant l'importance de l'aide des êtres qui m'aiment, je voudrai humblement leurs, dédier ce modeste travail tout en sachant qu'ils méritent le meilleur qui soit.

Je dédie ce travail :

*À mes chers parents que dieu les garde et les protèges
Qui on fait tant de sacrifice pour m'élever et m'instruire et qui
mon encourage tout le long de mon parcours scolaire et académique.*

À mes frères

*sadi, oulhadj, chérif et surtout mon grand frères hocine
Et mes Sœurs, qui m'ont soutenu surtout sur le plan moral.*

À mon Fidel amis et binôme saada nassim .

À mais Amis khardine, fares, farid , syfax et karim

Qui mon soutenu autant qu'ils peuvent.

*À mes cher enseignants qui mont dirigé et aider et surtout
soutenu.*

*À tous mes amis et camarade d'études et tout le groupe Energie
Renouvelable.*

Je mes excuses a ce que j'ai oublié

Aux étudiants de génie électrique et toute la promotion 2014/2015.

OUAZAR Abdellah

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I : Généralités sur l'énergie photovoltaïque	
Introduction.....	3
I.1 Energie solaire	4
I.2 Position du soleil	4
I.3 Système photovoltaïque.....	6
I.4 Avantages et inconvénients	7
I.4.1 Avantages	7
I.4.2 Inconvénients	7
I.5 Domaines d'application	8
I.6 Production de cellules et de modules	8
I.7 Principe de la photopile (cellule PV)	9
I.8 Caractéristique de la cellule PV.....	10
I.9 Influence des paramètres externes sur la caractéristique I(V).....	13
I.9.1 Influence de l'ensoleillement	13
I.9.2 Influence de la température	14
I.9.3 Influence des résistances série et parallèle.....	14
I.10 le facteur de forme.....	15
I.11 Le module PV	16
I.11.1 Constitution.....	16
I.11.2 Protection par diodes.....	16
I.12 Les systèmes PV	17
I.12.1 Système autonome sans batterie	18
I.12.2 Système autonome avec batterie.....	18
I.12.3 Système hybride PV/génératrice.....	18

I.12.4 Système PV sur réseau diesel.....	18
I.12.5 Système PV sur réseau décentralisé.....	18
I.12.6 Système PV centralisé	18
I.13 La recherche du point de puissance maximale MPP T.....	19
Conclusion.....	20
CHAPITRE II : Méthodes d'identification	
Introduction	21
II.1 Modèles électriques d'une cellule solaire à une seule diode.....	22
II.1.1 Modèle à une diode.....	22
II.1.1.1 Modèle à cinq paramètres (simple exponentielle)	22
II.1.1.2 Modèle à quatre paramètres	22
II.1.1.3 Modèle à trois paramètres (modèle idéal)	23
II.1.2 Modèle à deux diodes	24
II.1.2.1 Modèle à sept paramètres (double exponentielle)	24
II.1.2.2 Modèle à six paramètres	24
II.2 Méthodes d'extraction	25
II.2.1 Méthodes d'extraction à cinq paramètres	25
II.2.1.1 La méthode Newton-Raphson.....	25
II.2.1.2 Nouvelle méthode analytique	27
II.2.2 Méthodes d'extraction à quatre paramètres	29
II.2.2.1 Méthode explicite simplifiée	31
II.2.2.2 Méthode de la pente au point ($V_{co}, 0$)	32
Conclusion.....	34
CHAPITRE III : Application et résultats	
Introduction	35
III.1 Méthodes d'extractions proposées.....	35
III.1.1 Méthode Newton-Raphson	36

III.1.1.1 Organigramme	36
III.1.1.2 Bloc de simulation	37
III.1.1.3 Résultats	39
III.1.2 Nouvelle méthode analytique	40
III.1.2.1 Organigramme	40
III.1.2.2 Bloc de simulation	41
III.1.2.3 Résultats.....	43
III.1.3 Méthode explicite simplifiée	44
III.1.3.1 Organigramme	44
III.1.3.2 Bloc de simulation	45
III.1.3.3 Résultats.....	47
III.1.4 Méthode de la pente au point (V_{co} , 0)	48
III.1.4.1 Organigramme	48
III.1.4.2 Bloc de simulation	49
III.1.4.3 Résultats	51
III.2 Données du panneau	52
III.2.1 caractéristiques électriques et mécaniques de modèles photovoltaïques	52
III.2.1.1 caractéristiques électriques.....	52
III.2.1.2 caractéristiques mécaniques.....	53
III.2.2 La simulation expérimentale	53
III.3 Interprétation des résultats	54
Conclusion.....	56
CONCLUSION GENERALE	57

Liste des symboles

- j : Angle entre le soleil et le plan horizontal du lieu. [degré]
- C_{t-s} : La correction terre soleil
- δ : Déclinaison du soleil. [degré]
- J : est le numéro du jour de l'année à partir du premier janvier
- ω : Angle horaire du soleil. [degré]
- TSV : Temps solaire vrai [Heurs]
- TL : temps légal. (Donné par une montre). [Heurs]
- DE : décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich. [Heurs]
- ET : correction de l'équation du temps. [Sans unité]
- λ : longitude de lieu. [Degré]
- φ : Latitude de lieu. [degré]
- I: courant disponible [A]
- I_d : coutant de polarisation de la diode; [A]
- I_{sh} : courant de la résistance shunt; [A]
- I_{ph} : courant produit par la photopile ; [A]
- I_s : courant de saturation ; [A]
- (Φ) : Le flux lumineux
- $I_{ph,n}$: le courant produit dans les condition (STC) ; [A]
- $I_{cc,n}$:Le courant de court circuit nominale ; [A]
- I_{cc} : intensité de courant de court-circuit ; [A]
- $I_{s,n}$: Le courant de saturation dans les condition(STC)
- I_m : intensité de courant à puissance maximale ; [A]
- V_j : tension aux bornes de la jonction; [V]
- $V_{oc,n}$: Tension de circuit ouvert nominale ; [V]
- V_{pv} : la tension du panneau photovoltaïque ; [V]
- V_m : tension à puissance maximale ; [V]

V_{co} : tension de circuit ouvert ; [V]

V_T : est la tension thermique de la diode

N_s : nombre de cellule en série

E_g : Energie de Gap de la cellule [ev]

k : Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

T : La température ambiante [K]

T_n, T_{ref} : la température dans les conditions (STC) [K]

q : Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb

K_I : coefficient de température de courant de court circuit

G_n : ensoleillement dans les conditions (STC)

G : ensoleillement (w/m^2)

A : le facteur d'idéalité

R_{sh} : la résistance parallèle ; [Ω]

R_s : la résistance série ; [Ω]

α : Le coefficient d'incrémentation du courant I_{sc} ($A/^\circ C$)

β : Le coefficient d'incrémentation de la tension V_{oc} ($V/^\circ C$)

STC: ("Standard Test Conditions", $1000 W/m^2$, $25^\circ C$, specter AM1.5)

P : La puissance ; [W]

MPPT : Poursuite du point de puissance maximum (Maximum Power Point Tracking)

Liste des figures

CHAPITRE I

Fig. (I.1): Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil.....	5
Fig. (I.2): Définition de la position de soleil (hauteur et azimut).....	6
Fig. (I.3) : Schéma de principe de fonctionnement de la cellule PV.....	9
Fig. (I.4) : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV à une diode.....	10
Fig. (I.5) : Le schéma de simulation de la cellule PV (une diode).....	12
Fig. (I.6) : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes.....	13
Fig. (I.7) : Influence de l'ensoleillement à température constante sur la courbe I-V.....	13
Fig. (I.8) : Influence de la température à l'ensoleillement constante sur la courbe I-V.....	14
Fig. (I.9) : Influence de la résistance série.....	15
Fig. (I.10) : : Influence de la résistance parallèle.....	15
Fig. (I.11) : Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques.....	16
Fig. (I.12) : Schéma électrique équivalent du montage série-parallèle.....	17
Fig. (I.13) : Caractéristique courant/ tension / puissance d'un panneau PV.....	19

CHAPITRE II

Fig. II.1 Circuit équivalent au modèle à quatre paramètres.....	23
Fig. II.2 Circuit équivalent au modèle à trois paramètres.....	23
Fig. II.3 Circuit équivalent au modèle à six paramètres.....	24
Fig. (II.4) : Caractéristique I-(V).....	30
Fig. (II.5) : Le calcul de pente au point de tension de circuit ouvert.....	33

CHAPITRE III

Fig. III.1 Organigramme de la méthode de newton- Raphson.....	36
Fig.III.2 Bloc de simulation de la méthode de newton-raphson.....	37
Fig.III.3 schéma interne de la méthode de newton-raphson.....	38
Fig III.4 : Caractéristique I(V).....	39
Fig III.5 : Caractéristique P(V).....	39
Fig III.6 Organigramme de la nouvelle méthode analytique.....	40
Fig.III.7 Bloc de la nouvelle méthode analytique.....	41
Fig.III.8 schéma interne de la nouvelle méthode analytique.....	42
Fig III.9 : Caractéristique I(V).....	43
Fig III.10 : Caractéristique P(V).....	43
Fig III.11 Organigramme de la méthode explicite simplifiée.....	44
Fig.III.12 Bloc de la méthode explicite simplifiée.....	45
Fig.III.13 schéma interne de la méthode explicite simplifiée.....	46
Fig III.14 : Caractéristique I(V).....	47
Fig III.15 : Caractéristique P(V).....	47
Fig. III.16 Organigramme de la Méthode de la pente au point ($V_{co}, 0$).....	48
Fig.III.17 Bloc de la méthode de la pente au point ($V_{co}, 0$).....	49
Fig.III.18 schéma interne de la méthode de la pente au point ($V_{co}, 0$).....	50
Fig III.19 : Caractéristique I(V).....	51
Fig III.20 : Caractéristique P(V).....	51
Fig III.21 : Caractéristique I(V) et P(V).....	54
Fig III.22 : Caractéristique I(V).....	55
Fig III.23 : Caractéristique P(V).....	55

Liste des tableaux

CHAPITRE III

TAB III.1 Résultats des paramètres d'extractions de la méthode newton-raphson.....	39
TAB III.2 Résultats des paramètres d'extractions de la nouvelle méthode analytique.....	43
TAB III.3 Résultats des paramètres d'extractions de la méthode explicite simplifiée.....	47
TAB III.4 Résultats des paramètres d'extractions de la méthode de la pente au point ($V_{co}, 0$).....	51
Tab III.5 : caractéristiques électriques.....	52
Tab III.6 : caractéristiques mécaniques.....	53
Tab III.7 : Résultats des paramètres d'extractions.....	54

Introduction générale

Depuis le début de la révolution industrielle, le besoin énergétique, sous ses diverses formes, a rencontré une augmentation très significative, ce qui a obligé les scientifiques de chercher de nouvelles solutions pour fournir et développer, et même de rationaliser l'exploitation des énergies.

Jusqu'à maintenant, l'énergie électrique est la source la plus utilisée dans les différents domaines, dans les plus grandes usines aux plus petits appareils électroniques. Pour générer cette énergie, plusieurs techniques sont utilisées, on trouve notamment les Générateurs, basés sur l'énergie fossile, particulièrement le pétrole, ou bien qui utilisent l'énergie nucléaire. Ces types d'énergie posent des problèmes environnementaux et même économiques, ce qui oblige à penser sérieusement aux énergies renouvelables.

Parmi les énergies les plus modernes, qui ont un brillant avenir, car ils sont propres et écologiques : « l'énergie solaire ». Il existe plusieurs façons d'utiliser cette énergie pour produire de l'électricité, mais la méthode la plus importante, et celle qui nous concerne dans ce mémoire, est la méthode basée sur le principe de la photovoltaïque, elle a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable

La première cellule photovoltaïque a été réalisée en 1954, à base de silicium, aujourd'hui il reste encore le matériau le plus couramment utilisé.

La modélisation mathématique des cellules solaires est indispensable pour toute opération d'optimisation du rendement ou de diagnostic du générateur photovoltaïque. Le module photovoltaïque est représenté généralement par un circuit équivalent dont les paramètres sont calculés expérimentalement en utilisant la caractéristique courant-tension, I-V.

Ces dernières s'impose comme une étape cruciale et a conduit à une diversification dans les modèles proposés par les différents chercheurs. Leurs différences se situent principalement dans le nombre de diodes, la résistance shunt finie ou infinie, le facteur d'idéalité constant ou non, ainsi que les méthodes numériques utilisées pour la détermination des différents paramètres inconnus. [1,2]

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles que leurs précisions restent tributaire à la modélisation mathématiques des différents phénomènes physiques intrinsèques intervenant dans le processus de production d'électricité. Dans la plupart des travaux de la littérature, on trouve

principalement le modèle équivalent à quatre paramètres basés sur la modélisation mathématique de la courbe courant-tension $I(V)$. [3]

Dans ce modèle, l'effet de la résistance shunt est négligé du fait que sa valeur est importante et plus particulièrement pour les modules au Si-cristallin. Le modèle à quatre paramètres fait intervenir quatre paramètres, à savoir: I_{ph} (le photo courant), I_s (le courant de saturation), A (le facteur d'idéalité) et R_s (la résistance série). Ces paramètres ne sont pas généralement des quantités mesurables ou incluses dans les données de la fabrication. En conséquence, ils doivent être déterminés à partir des systèmes des équations à divers points de fonctionnement donnés par le constructeur ou tirés des essais expérimentaux. [3]

Dans le premier chapitre on a présenté une généralité sur la technologie photovoltaïque, on a commencé par des notions sur le rayonnement solaire. Puis, on a cité les différentes filières technologiques des cellules solaires, ensuite on a montré le principe de l'effet photovoltaïque et le fonctionnement des cellules solaires.

Au final on a présenté des différents montages des cellules solaires dans un module photovoltaïque.

Le deuxième chapitre, est destiné à la présentation et l'étude des principes physiques et électriques des cellules photovoltaïques, et l'extraction des paramètres de la cellule photovoltaïque exploitant uniquement les données du constructeur. Dans un premier temps, on a présenté les différents modèles qui décrivent le comportement des cellules photovoltaïques, ensuite on a discuté la méthode et la technique utilisées pour l'identification des paramètres ainsi que le modèle choisi.

Le chapitre III a l'objectif de comparer les méthodes numériques les plus utilisées de point de vue caractérisation des cellules solaires à base du Si-cristallin, à savoir: la méthode de Newton-Raphson la nouvelle méthode analytique, la méthode explicite simplifiée, la méthode de la pente.

Les résultats de simulation sont confrontés à ceux des différents constructeurs afin de valoriser les différentes conclusions tirées à propos des méthodes qu'on a exploitées. Et ça après la présentation des organigrammes de chaque méthode, est ensuite la simulation de ces méthodes.

Introduction :

On distingue plusieurs types de sources d'énergies renouvelables: l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie éolienne, l'énergie de la biomasse et l'énergie photovoltaïque. Excepté l'énergie géothermique qui provient de la chaleur des profondeurs de la terre, ces sources d'énergie proviennent directement ou indirectement du soleil. Elles sont donc disponibles indéfiniment tant que celui-ci brillera.

L'énergie photovoltaïque a l'avantage d'être non polluante, souple et fiable. [4]

Historique :

Les systèmes photovoltaïques sont utilisés depuis 40 ans. Les applications ont commencé avec le programme spatial pour la transmission radio des satellites. Elles se sont poursuivies avec les balises en mer et l'équipement de sites isolés dans tous les pays du monde, en utilisant les batteries pour stocker l'énergie électrique pendant les heures sans soleil.

Dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque : [5]

1839: le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.

1875: Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la Seconde Guerre Mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.

1954: trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.

1958: une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973: la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.

1983: la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

I.1 Energie solaire :

Le rayonnement solaire constitue la ressource énergétique la mieux partagée sur la terre et la plus abondante. La quantité d'énergie libérée par le soleil (captée par la planète terre) pendant une heure pourrait suffire à couvrir les besoins énergétiques mondiaux pendant un an. [5]

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre (pour une distance moyenne terre-soleil de 150 Millions de km), c'est ce que l'on appelle la constante solaire égale à $1\ 367\text{W/m}^2$. La partie d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM. Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de $1000\ \text{W/m}^2$ et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à $1000\ \text{W/m}^2$. [5]

En résumé, la constante solaire est le flux énergétique reçu par une surface unité. Dans notre cas, la valeur qui a été retenue en 1980 est: $I_0 = 1367\ \text{W/m}^2$

I_0 est variable autour de l'année puisque la distance terre soleil est elle-même variable. (Trajectoire elliptique). La correction terre soleil est donnée par:

$$C_{t-s} = 1 + 0.034 \cos\left(\frac{360}{365}(j - 2)\right) \quad (\text{I.1})$$

Où :

j: Angle entre le soleil et le plan horizontal du lieu. [Degré]

C_{t-s} : La correction terre soleil

La constante solaire corrigée est:

$$I = I_0 C_{t-s} \quad (\text{W/m}^2) \quad (\text{I.2})$$

I.2 Position du soleil :

La position du soleil est repérée à chaque instant de la journée et de l'année par deux systèmes de coordonnées différents.

➤ Coordonnées équatoriales : [6]

Le mouvement du soleil est repéré par rapport au plan équatorial de la terre à l'aide de deux angles. (La déclinaison et horaire). (Fig. I.1).

• Déclinaison du soleil :

L'angle que fait la direction du soleil avec sa projection sur le plan équatorial.

$$\delta = 23.45^\circ \sin[0.980(J + 284)] \quad [\text{Degré}] \quad (\text{I.3})$$

J : est le numéro du jour de l'année à partir du premier janvier.

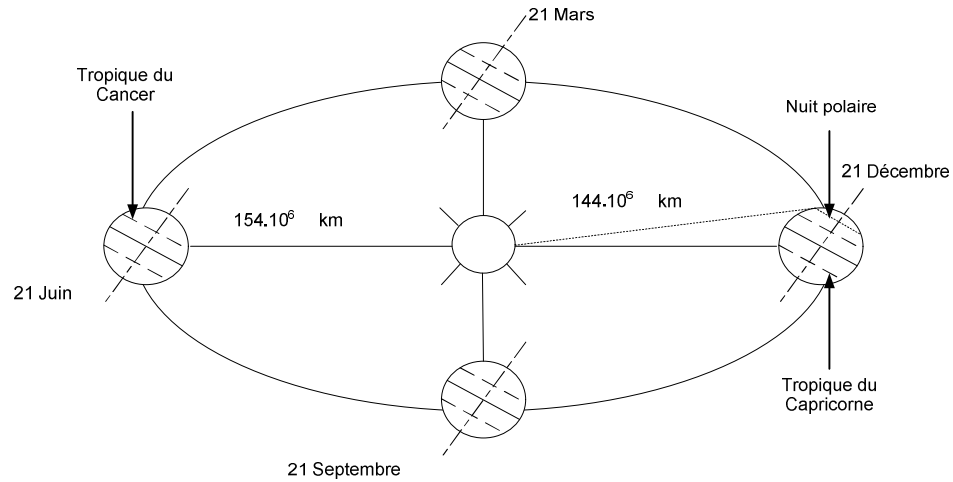


Fig. (I.1): Schématisation des mouvements de la Terre autour du Soleil

• Angle horaire du soleil :

C'est l'angle compris entre la méridienne origine passant par le sud et la projection du soleil sur le plan équatorial, il mesure la course du soleil dans le ciel.

L'angle horaire est de 0 à midi qui est donné par la formule suivante :

$$\omega = 15(\text{TSV} - 12) \quad [\text{Degré}] \quad (\text{I.4})$$

$$\text{TSV} = \text{TL} - \text{DE} + \left(\frac{\text{Et} + 4\lambda}{60} \right) \quad [\text{Heurs}] \quad (\text{I.5})$$

$$\begin{aligned} \text{ET} = & -[0,0002 - 0,4797 \cos(\omega') + 3,2265 \cos(2\omega') + 0,0903 \cos(3\omega')] \\ & + 7,3509 \sin(\omega') + 9,3912 \sin(2\omega') + 0,3361 \sin(3\omega') \end{aligned} \quad (\text{I.6})$$

$$\omega' = 0,984$$

J : nombre du jour de l'année

TSV : temps solaire vrai, le temps solaire vrai est égal au temps légal corrigé par un décalage dû à l'écart entre la longitude du lieu et la longitude référence. [Heurs]

L'angle vaut 0° à midi, 90° à 18 heures et -90° à 6 heures,

DE : décalage horaire par rapport au méridien de Greenwich. (Égale 1 pour l'Algérie). Le terme relatif à l'équation du temps est généralement négligeable. [Heurs]

TL : temps légal. (Donné par une montre). [Heurs]

ET : correction de l'équation du temps. [Sans unité]

λ : longitude de lieu. [degré]

➤ Coordonnées horizontales :

Le repère horizontal est formé par le plan de l'horizon astronomique et le vertical du lieu. Dans ce repère, les coordonnées sont la hauteur h et l'azimut a. (Fig. I.2).

• **Hauteur du soleil :**

C'est l'angle formé par la direction du soleil et sa projection sur le plan horizontal. Il est particulièrement égal à:

0° au lever et au coucher astronomiques du soleil,

90° à midi temps solaire vrai

φ : Latitude de lieu.

$$\sin(h) = \cos(\delta) \cos(\varphi) \cos(\omega) + \sin(\varphi) \sin(\delta) \quad [\text{degré}] \quad (I.7)$$

• **Azimet du soleil :**

C'est l'angle compris entre la projection de la direction du soleil sur le plan horizontal et la direction sud.

$$\sin(a) = \frac{\cos(\delta) \sin(\omega)}{\cos(h)} \quad (I.8)$$

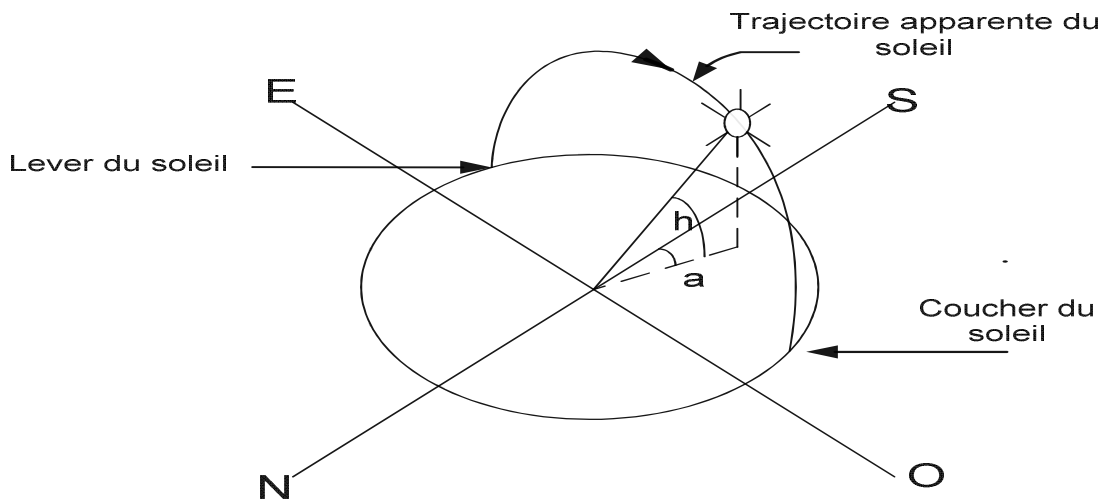


Fig. (I.2): Définition de la position de soleil (hauteur et azimet)

I.3 Système photovoltaïque

La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module (ou panneau).

Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension.

La plupart des modules commercialisés sont composés de 36 cellules en silicium cristallin, connectées en série pour des applications en 12 V. Le courant de sortie, et donc la puissance, sera proportionnel a la surface du module.

L'interconnexion de modules entre eux en série ou en parallèle pour obtenir une puissance encore plus grande, définit la notion de champ photovoltaïque. Le générateur photovoltaïque se compose d'un champ de modules et d'un ensemble de composants qui adapte l'électricité produite par les modules aux spécifications des récepteurs. Cet ensemble, appelé aussi "Balance of System" ou BOS, comprend tous les équipements entre le champ de modules et la charge finale, à savoir la structure rigide (fixe ou mobile) pour poser les modules, le câblage, la batterie en cas de stockage et son régulateur de charge, et l'onduleur lorsque les appareils fonctionnent en courant alternatif.

Le système photovoltaïque est alors l'ensemble du générateur photovoltaïque et des équipements de consommation. [6]

I.4 Avantages et inconvénients :

I.4.1 Avantages :

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

- D'abord, une haute fiabilité, qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Ensuite, le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé.
- Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

I.4.2 Inconvénients :

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients.

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium cristallin est de 28%)
- Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs Diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

Enfin, lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur photovoltaïque est accru.

La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis. [6]

I.5 Domaines d'application [6]

- Domaine spatial.
- Habitation isolée.
- Industrie isolée.
- Centrale de puissance.
- Résidence urbaine.
- Biens de consommation

I.6 Production de cellules et de modules :

Il existe essentiellement Cinq technologies de cellules photovoltaïques, on les présentes sur le tableau suivant : [6]

Matériau	Rendement	Longévité	caractéristiques	Principales utilisations
Silicium mono cristallin	12 à 18% (24,7 en laboratoire)	20 à 30 ans	* Très performant * Stabilité de production d'W * Méthode de production coûteuse et laborieuse. *35% du marché mondial	Aérospatiale, modules pour toits, façades,...
Silicium poly cristallin	11 à 15% (19,8% en laboratoire)	20 à 30 ans	* Adapté à la production à grande échelle. * Stabilité de production d'W. Plus de 50% du marché mondial.	Modules pour toits, façades, générateurs...
Amorphe	5 à 8% (13% en laboratoire)		* Peut fonctionner sous la lumière fluorescente. * Fonctionnement si faible luminosité. * Fonctionnement par temps couvert. * Fonctionnement si ombrage partiel * La puissance de sortie varie dans le temps. En début de vie, la puissance délivrée est de 15 à 20% supérieure à la valeur nominale et se stabilise après quelques mois.	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment
Composite mono cristallin (GaAs)	18 à 20% (27.5% en laboratoire)		* Lourd, fissure facilement	Systèmes de concentrateurs Aérospatiale (satellites)
Composite poly cristallin (CdS, CdTe, CuInGaSe2, etc.)	8% (16% en laboratoire)		Nécessite peu de matériaux mais certains contiennent des substances polluantes	Appareils électroniques (montres, calculatrices...), intégration dans le bâtiment

I.7 Principe de la photopile (cellule PV) :

Cette photopile, qu'on appelle aussi cellule solaire ou photovoltaïque, est fabriquée à l'aide de matériaux semi-conducteurs comme les transistors ou les puces dans un ordinateur. On peut la représenter comme une diode plate qui est sensible à la lumière.

Un photon (particule de lumière) dont l'énergie est suffisante et heurtant un atome peut arracher un électron. Il crée ainsi un pair électron – trou. L'électron ayant acquis suffisamment d'énergie peut se déplacer vers la jonction N/P, où la présence du champ électrique a pour conséquence la collecte de l'électron vers la région N.

Une tension électrique apparaît entre les deux côtés N et P. Le dispositif devient donc générateur électrique sous l'effet de la lumière. La collecte de courant se fait par les contacts métalliques (électrodes). Si ces électrodes sont reliées à un circuit extérieur, un courant circule. Le courant produit par une cellule photovoltaïque est un courant continu.

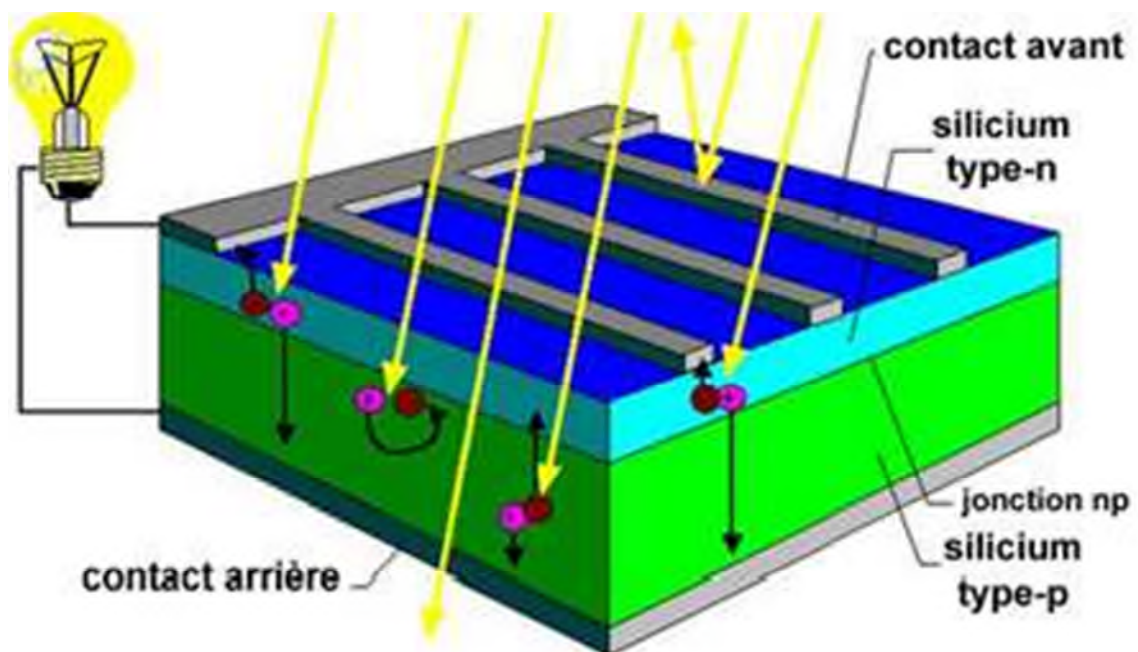


Fig. (I.3) : Schéma de principe de fonctionnement de la cellule PV [7]

Le fonctionnement de la photopile est basé sur les propriétés électroniques acquises par le silicium quand des atomes étrangers en petit nombre (des « impuretés ») sont substitués dans un réseau cristallin. Cette action est appelée dopage.

- Si l'atome d'impureté contient plus d'électrons que le silicium, le matériau contiendra des électrons libres en excès : il sera dit de type N (exemple : silicium dopé au phosphore).
- Si au contraire, l'atome d'impureté contient moins d'électrons que le silicium, le matériau sera déficitaire en électrons : il sera dit de type P (exemple : silicium dopé au bore).

La fabrication des cellules s'effectue à partir de lingots de silicium. Ces lingots sont découpés en fines couches. Des couches de type P ou N sont créées en y diffusant du bore ou du phosphore.

Une cellule solaire est alors obtenue en constituant une jonction de deux zones de type opposé (jonction PN). Au voisinage de la jonction apparaît un champ électrique qui maintient la séparation des charges positives et négatives. Des contacts métalliques en forme de grille (contacts avant et arrière) sont déposés sur chaque face de la cellule.

En effet, toute l'énergie de la lumière solaire n'est pas transformée en électricité, car :

- Certains photons sont réfléchis sur la face avant des photopiles ;
- Certains ne sont pas assez énergétiques pour arracher un électron ;
- Seuls les photons d'énergie suffisante sont absorbés et créés des paires électrons/ trous ;
- Enfin de nombreux électrons créés rencontrent des charges positives et se recombinent avant d'avoir fourni un courant utile. [7]

I.8 Représentation de la cellule PV:

➤ Avec une diode :

La caractéristique du courant $I = f(v)$ d'une cellule photovoltaïque peut être schématisée comme suite : [8]

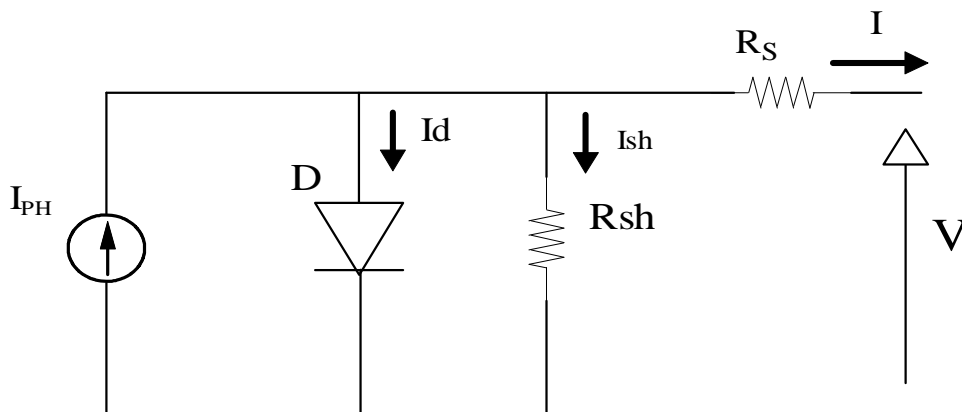


Fig. (I.4) : Schéma électrique équivalent d'une cellule PV à une diode [8]

L'équation de la cellule PV de la figure I.4 ci-dessus, peut se mettre comme suite :

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (I.9)$$

Avec : I : courant disponible; [A]

I_{ph} : courant produit par la photopile ; [A]

Ce courant est proportionnel au flux lumineux (Φ) ;

I_d : courant de polarisation de la diode; [A]

I_{sh} : courant de la résistance shunt; [A]

Avec :

$$I_d = I_s \left[\exp\left(\frac{V+R_s I}{A \cdot V_t}\right) - 1 \right] \quad (I.10)$$

I_s : Le courant de saturation [A]

R_s : La résistance série [Ω]

$V_t = N_s k T / q$, N_s , nombre de cellule en série

k : Constante de Boltzmann = $1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K

q : Charge de l'électron = $1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulomb

A : coefficient d'idéalité de la diode

T : La température ambiante [K]

On a:

$$I_s = I_{s,n} \left(\frac{T_n}{T}\right)^3 \exp \left[\frac{q E_g}{A k} \left(\frac{1}{T_n} - \frac{1}{T} \right) \right] \quad (I.11)$$

Avec:

$$I_{s,n} = \frac{I_{cc,n}}{\exp\left(\frac{V_{oc,n}}{A V_{t,n}}\right) - 1} \quad (I.12)$$

$I_{s,n}$: Le courant de saturation dans les condition(STC) (1000w/m^2 , 25°c)

T_n : la température dans les conditions (STC)

E_g : Energie de Gap de la cellule. (Silicium cristallin $E_g = 1,12$ eV, Silicium amorphe $E_g = 1,7$ eV, CIS = $1,03$ eV, CdTe = $1,5$ eV).

$I_{cc,n}$: Le courant de court circuit nominale ; [A]

$V_{oc,n}$: tension de circuit ouvert nominale [V]

On a:

$$I_{sh} = \frac{V}{R_{sh}} \quad \text{Car } R_s \ll R_{sh} \quad [A] \quad (I.13)$$

$$I_{ph} = (I_{ph,n} + K_I \Delta T) G / G_n \quad [A] \quad (I.14)$$

R_{sh} : la résistance parallèle ; [Ω]

$I_{ph,n}$: le courant produit dans les condition (STC) [A]

$\Delta T = T - T_n$ [K]

K_I : coefficient de température de courant de court circuit

G : ensoleillement (w/m^2)

G_n : ensoleillement dans les conditions (STC)

Alors l'équation d'une cellule photovoltaïque peut se mettre comme suit :

$$I = I_{ph} - I_S \left[\exp \left(q \cdot \frac{(V+R_S \cdot I)}{A \cdot K \cdot T} - 1 \right) \right] - \frac{V}{R_{sh}} \quad (I.15)$$

Simulation de cellule PV (une diode) :

La figure suivante présente la simulation de la cellule photovoltaïque a une diode on utilisant Matlab semulink.

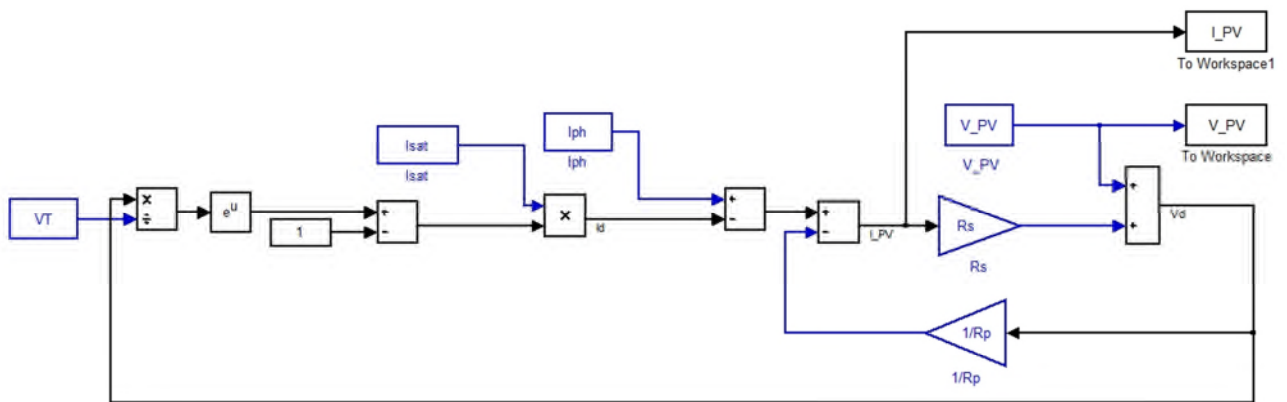


Fig. (I.5) : Le schéma de simulation de la cellule PV (une diode)

➤ Avec deux diodes : [6]

Nous avons, cette fois-ci, deux diodes pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction PN. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface du matériau et d'autre part dans le volume du matériau. Le schéma du générateur photovoltaïque devient dans le cas de la figure I-6

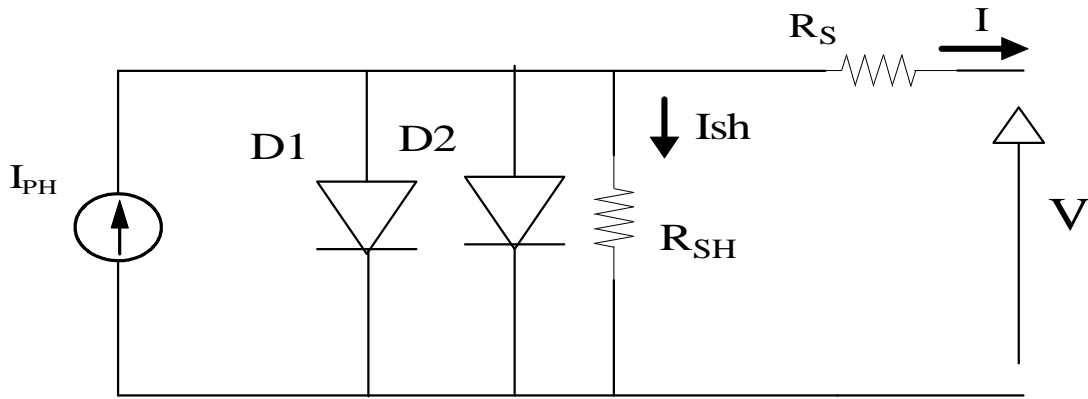


Fig. (I.6) : Schéma équivalent d'une cellule PV Modèle à deux diodes

$$I = I_{ph} - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} - I_{S1} \left[\exp\left(\frac{q(V+R_s I)}{A_1 kT}\right) - 1 \right] - I_{S2} \left[\exp\left(\frac{q(V+R_s I)}{2A_2 kT}\right) - 1 \right] \quad (I.17)$$

I.9 Influence des paramètres externes sur la caractéristique I (V) : [8]

I.9.1 influence de l'ensoleillement :

Le courant produit par la photopile (I_{ph}) est pratiquement proportionnel au flux lumineux (Φ).

Par contre, la tension (v) aux bornes de la jonction varie peu, car elle est fonction de la différence de potentiel à la jonction N-P du matériau lui-même (pour le silicium monocristallin, elle est de 590 mV pour $T_j = 25^\circ\text{C}$). La tension de circuit ouvert ne diminuera pas que légèrement avec le flux lumineux. Ceci implique donc que :

- La puissance optimale de la cellule (P_m) est pratiquement proportionnelle à l'éclairement ;
- Les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension (voir figure I.8).

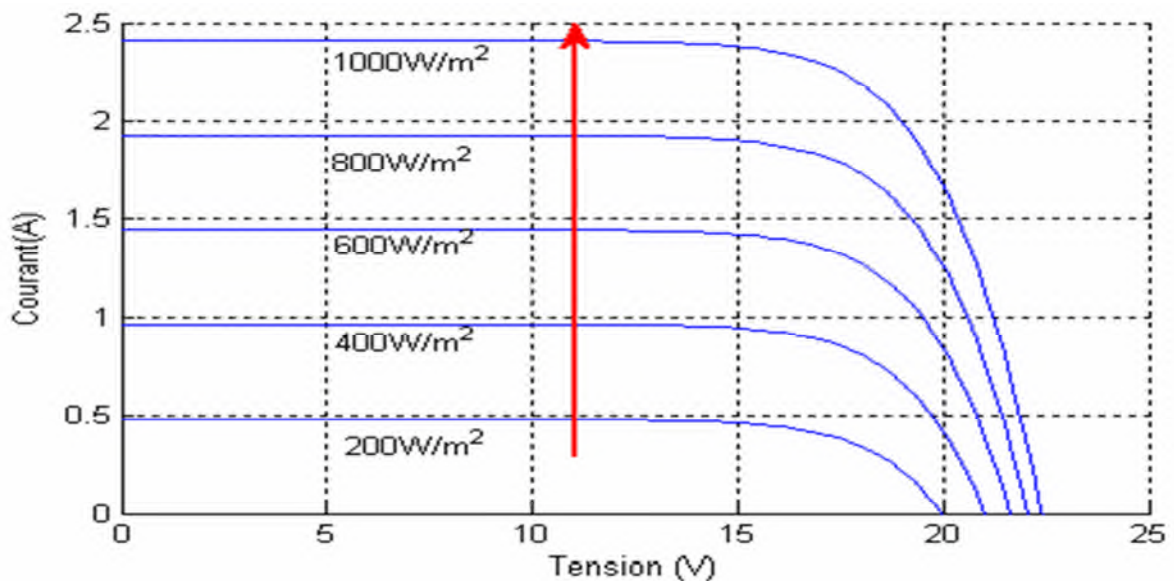


Fig. (I.7) : Influence de l'ensoleillement à température constante sur la courbe I-V

I.9.2 influence de la température :

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant / tension d'un semi-conducteur (voir la figure I.8). Pour le silicium, lorsque la température augmente, le courant augment d'environ $0.025 \text{ mA/cm}^2/\text{°C}$ alors que la tension décroît de $2,2 \text{ mV/°C/cellule}$. Cela se traduit par une baisse de puissance d'environ $0.4\%/°\text{C}$. Cette influence devra être prise en compte lors du dimensionnement du générateur photovoltaïque.

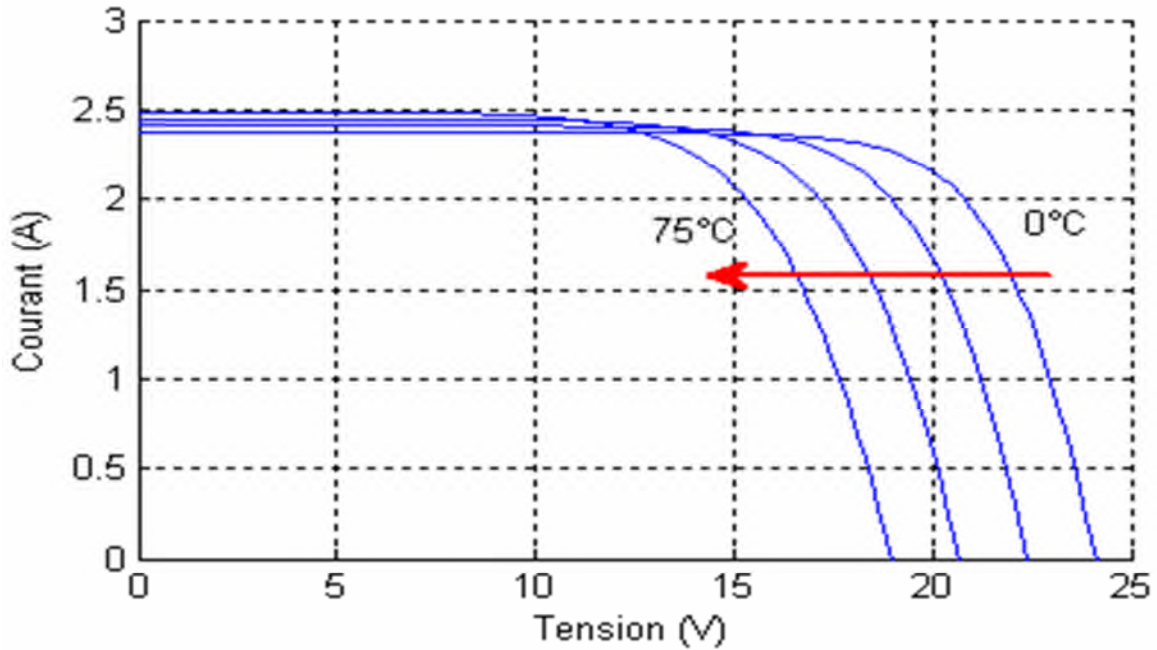


Fig. (I.8) : Influence de la température à l'ensoleillement constante sur la courbe I-V

Une convention internationale définit la puissance d'une cellule en Watt crête (W_c). Le W_c est la puissance optimale fournie par la photopile sous des conditions de mesures normalisées, c'est-à-dire pour un ensoleillement de 1 KW/m^2 et pour une température de jonction de la cellule de 25°C

Le rendement de conversion (efficacité) d'une cellule est le rapport entre la puissance électrique optimale (P_m) et la puissance solaire reçue à la température de référence. Ainsi, une simple cellule de silicium monocristallin ayant une surface de $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ aura une efficacité d'environ 14% et produira environ $1,4 W_c$ à 0,5 volt.

I.9.3 Influence des résistances série et parallèle :

Les performances d'une cellule photovoltaïque sont d'autant plus dégradées que la résistance série est grande ou que la résistance shunt est faible. La figure 4.10.a montre l'influence de R_s sur la caractéristique I(V). La courbe en bleu correspond à une valeur non nulle de R_s . Cette influence est traduite par une diminution de la pente de la courbe dans la zone où la cellule fonctionne comme source de tension. La chute de tension correspondante est liée au courant généré par la cellule. Quant à la R_{sh} est liée directement au processus de fabrication, son influence pour de très faibles valeurs de courant. La figure 4.10.b montre que cette influence se traduit par une augmentation de

la pente de la courbe de puissance de la cellule dans la zone correspond à un fonctionnement comme source de courant.

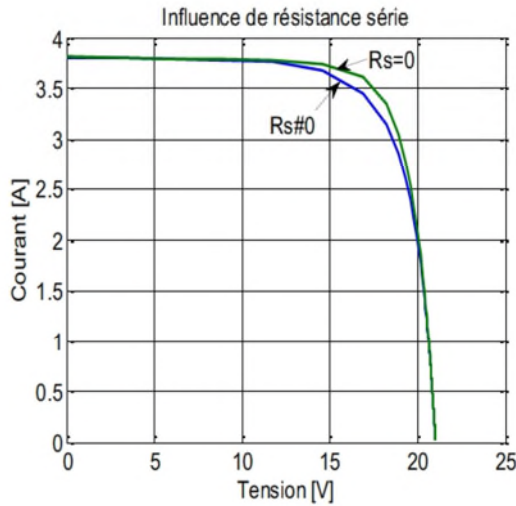


Fig. (I.9) Influence de la résistance série

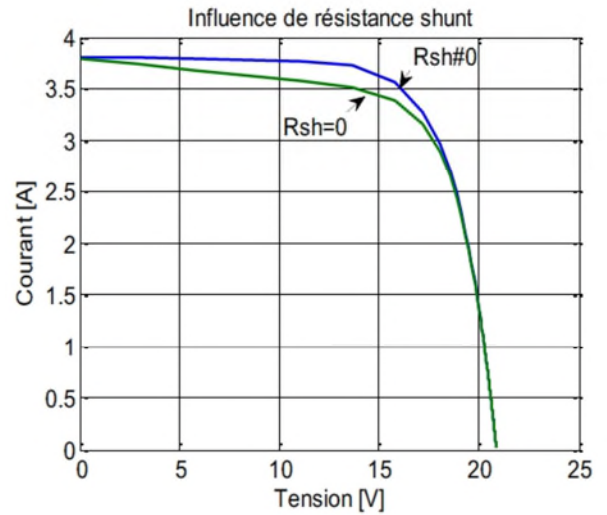


Fig. (I.10) Influence de la résistance parallèle

I.10 le facteur de forme

Plus la courbe est carrée, plus la puissance augmente, on mesure cette propriété par le facteur de forme ff (filling factor), qui est le rapport entre la valeur maximale de la puissance pouvant être extraite ($I_m \times V_m$) de la photopile sous les conditions de la mesure standardisées, et le produit $I_{cc} \times V_{co}$.

$$ff = \frac{I_m \times V_m}{I_{cc} \times V_{co}} \quad (I.16)$$

Avec : I_m : intensité de courant à puissance maximale ; [A]

V_m : tension à puissance maximale ; [V]

I_{cc} : intensité de courant de court-circuit ; [A]

V_{co} : tension de circuit ouvert. [V]

Pour une cellule de fabrication industrielle, le facteur de forme est de l'ordre de 70%. [8]

I.11 le module PV :

I.11.1 constitution :

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12 Volts et les modules auront donc généralement 36 cellules de plus, la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque. Ils peuvent être branchés en série pour augmenter leur tension d'utilisation et en parallèle pour augmenter leur courant, car le nombre de modules qui constituent le générateur photovoltaïque est déterminé à partir des besoins en énergie électrique du futur utilisateur et des caractéristiques climatiques du site : ensoleillement, température...etc. l'ensemble de modules est appelé le champ de modules PV.

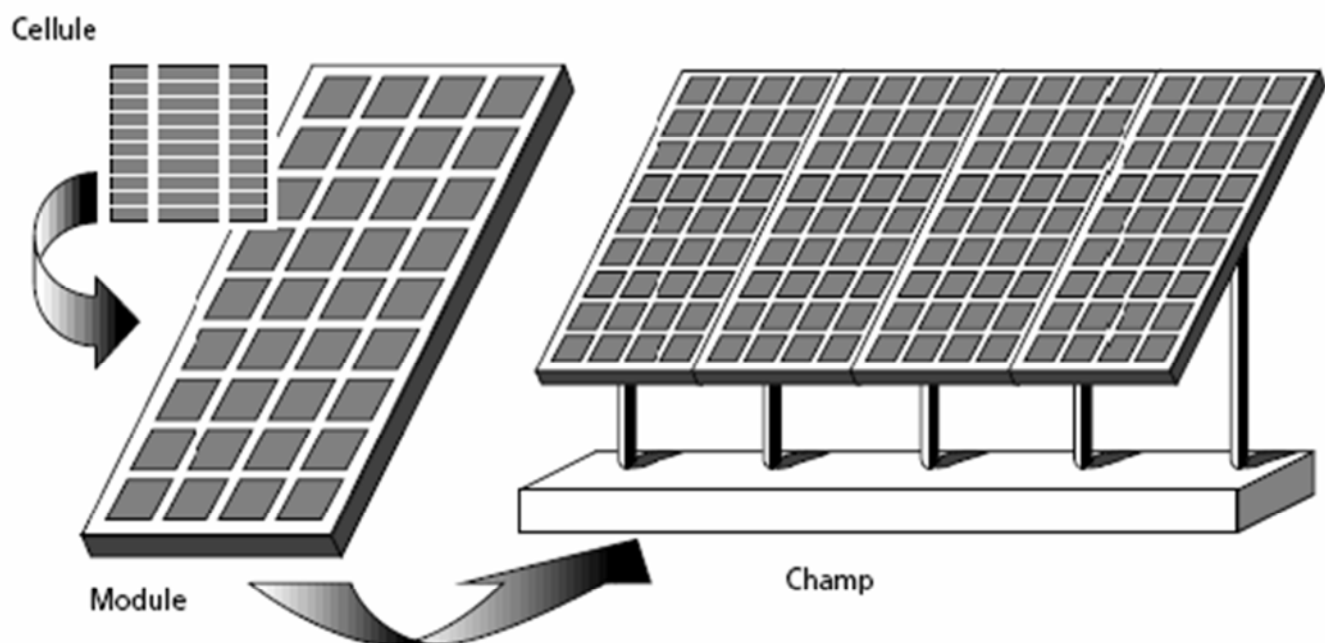


Fig. (I.11) : Composantes d'un générateur de modules photovoltaïques [8]

I.11.2 protection par diodes :

Dans le cas de branchement série, il peut arriver que des l'un des modules soit à l'ombre, tandis que les s'autres sont en plein soleil. Le module à l'ombre ne fournit plus de photocourant et devient récepteur, car il reçoit en sans inverse le courant fourni par les autres modules. Il peut donc se chauffer et se détériorer par claquage sous l'effet de la tension inverse maximale. Pour éviter un tel risque il convient donc de limiter la tension inverse maximale susceptible de se développer aux bornes d'une cellule en plaçant une diode parallèle (by-pass) au niveau de chaque module. La diode parallèle limite la tension inverse par sa tension directe puisqu'elle devient passante. La puissance dissipée par la cellule moins efficace se limite à l'ordre du watt, ce qui évite toute destruction. La diode parallèle est inopérante en fonctionnement normale et ne diminue pas le rendement des modules.

Aussi dans le cas de branchement parallèle, si les modules en parallèles ne sont pas identiques ou si quelques cellules d'un module sont ombragées. Le courant d'utilisation total des modules sera plus

faible. Pour une impédance de charge élevée, les modules moins performants deviendront récepteurs si la tension d'utilisation est supérieure à la tension produite par ces modules.

Une dissipation de puissance importante peut devenir dangereuse au niveau de la cellule la plus faible de ces modules. Ainsi pour le cas le plus critique ou la charge est nulle et le circuit ouvert, le courant des branches des modules performants se dissipera dans la branche la moins performante.

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

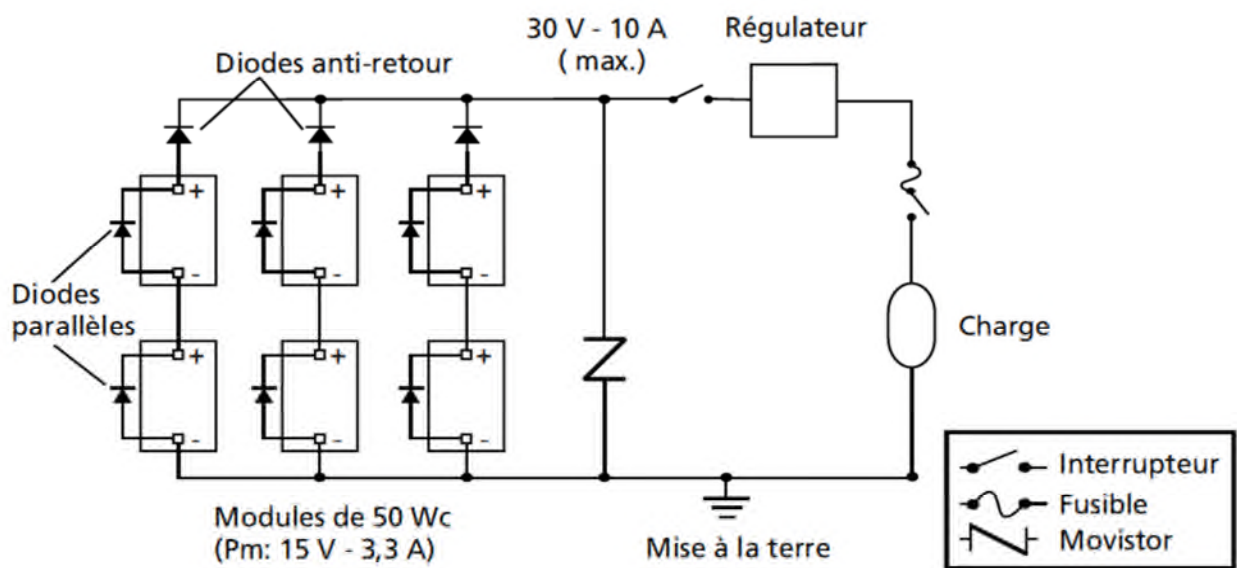


Fig. (I.12) : Schéma électrique équivalent du montage série-parallèle. [8]

Pour protéger l'installation contre les surtensions dues à la foudre, un varistor à oxyde métallique (movistor) est installé à l'entrée du conditionneur. Ce movistor absorbe la charge provoquée par la foudre en agissant comme un condensateur lorsqu'il détecte une tension anormalement supérieure aux conditions de fonctionnement. En absorbant l'énergie de la foudre, le movistor s'autodétruit et doit être remplacé. [8]

I.12 les systèmes PV :

Bien qu'il existe une grande variété de systèmes photovoltaïques, on peut cependant les classer en six groupes distincts. Les trois premiers groupes sont des systèmes autonomes, non reliés à un réseau électrique. Les trois autres types sont des systèmes PV reliés différemment au réseau électrique. [8]

I.12.1 système autonome sans batterie :

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité, soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage (calculatrice), soit que le temps de fonctionnement de la charge n'est pas critique (pompe à eau : le réservoir d'eau sert de stockage).

I.12.2 Système autonome avec batterie :

C'est le système photovoltaïque le plus commun. Le champ PV sert de chargeur pour la batterie. L'électricité peut alors être utilisée en tout temps. Par exemple, ce système est bien adapté pour l'éclairage d'une maison ou il faut de l'électricité lorsqu' 'il ne fait plus jour.

I.12.3 système hybride PV/génératrice :

Ce système utilise les avantages de l'énergie photovoltaïque et de la génératrice au diesel, au propane ou à l'essence. Le système photovoltaïque fournit une énergie intermittente mais souvent moins coûteuse en régions éloignées.

La génératrice sert d'énergie d'appoint, selon la demande. Ce type de système s'applique particulièrement bien à des sites éloignés où il est important d'avoir de l'électricité à tout moment, où les coûts de transport du carburant sont élevés et où il n'est pas encore rentable d'utiliser le système photovoltaïque seul avec les batteries.

Les systèmes hybrides PV/génératrice sont souvent utilisés pour les tours de communications ainsi que pour les refuges et les camps forestiers en régions éloignées. Ils peuvent également être couplés avec d'autres sources d'énergie telles les éoliennes et les microcentrales hydrauliques, lorsqu'il y a une complémentarité des productions électrique.

I.12.4 système PV sur réseau diesel :

Ce système est utilisé principalement dans les communautés ou les villages éloignés. Le générateur PV est branché en parallèle avec les génératrices au diesel du réseau villageois et fournit l'électricité sur ce réseau lorsque l'ensoleillement le permet. Il permet de réduire la consommation d'un carburant diesel très coûteux en régions éloignées et diminue les temps de fonctionnement des génératrices.

I.12.5 système PV sur réseau décentralisé :

Ce système photovoltaïque est branché directement sur un réseau électrique, mais il est installé près de la demande. Il peut être installé par exemple, sur une résidence individuelle ou sur un centre commercial, de telle sorte qu'il alimente cette charge et fournit l'excédent de sa production sur le réseau durant le jour. Durant la nuit, la charge puise l'énergie requise sur le réseau. Ce système permet de diminuer les frais de transport d'électricité et la surcharge de ligne, particulièrement en ce qui a trait aux charges adaptées à la production photovoltaïque, tels les systèmes d'air conditionné (gestion de la demande).

I.12.6 système PV centralisé :

Ce système fonctionne comme une centrale électrique normale mais doit tenir compte de la fluctuation de la production d'énergie qui est liée à l'ensoleillement.

I.13 la poursuite du point de puissance maximal MPPT:

La conception de systèmes photovoltaïques optimisée est assez difficile. En effet, coté source pour un générateur photovoltaïque, la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement, de la température. Pour que le générateur fonctionne le plus souvent possible dans son régime optimal, la solution communément adoptée est d'introduire un convertisseur statique qui jouera le rôle d'adaptateur source-charge dans des conditions données, c'est-à-dire au point de puissance maximale de la caractéristique puissance en fonction de la tension représentée à la figure (I.10) à éclairement 800 W / m^2 et la température 25°C

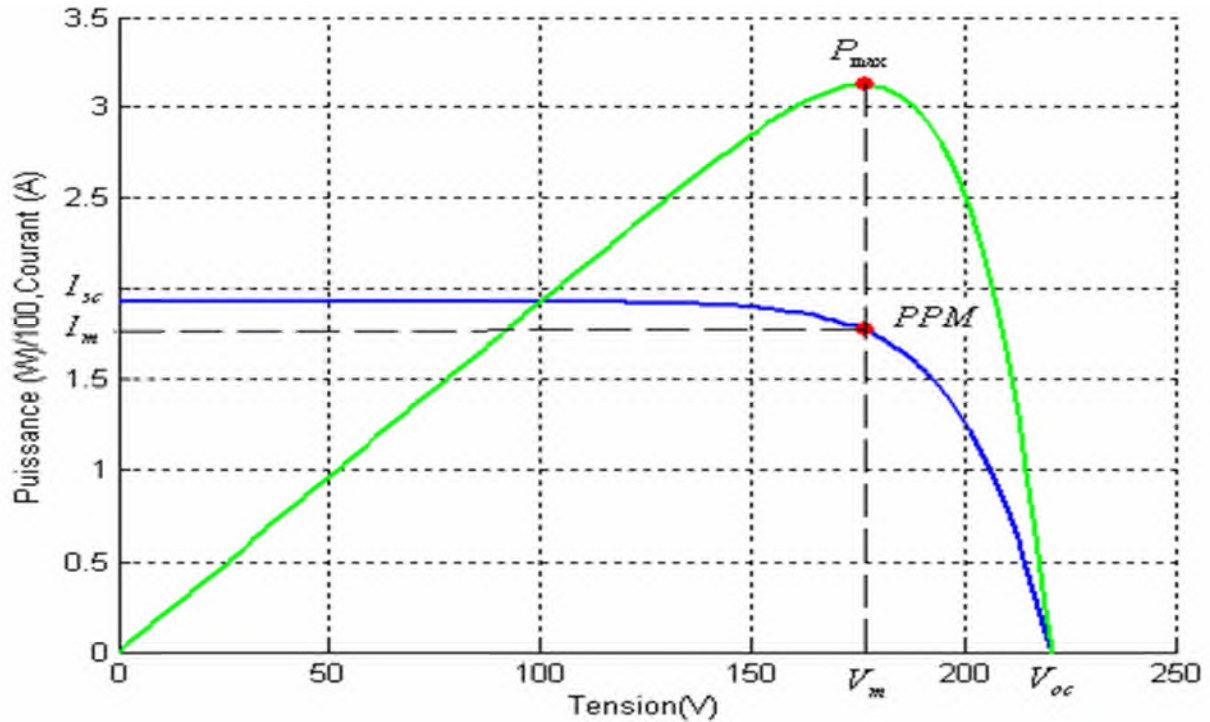


Fig. (I.13) : Caractéristique courant/ tension / puissance d'un panneau PV

Pour assurer le fonctionnement d'un générateur PV à son point de puissance maximale (PPM), des contrôleurs MPPT sont souvent utilisés. Ces contrôleurs sont destinés à minimiser l'erreur entre la puissance de fonctionnement et la puissance maximale de référence variable en fonction des conditions climatiques [9-10].

La puissance de fonctionnement du générateur PV est facilement calculée à partir du produit tension-courant. Par contre, la détermination de la puissance maximale de référence est plus délicate vue que cette dernière est fonction des conditions climatiques (éclairement, température). Cette référence, étant alors non constante et étant caractérisée par une fonction non linéaire, rend le fonctionnement à puissance maximale plus difficile à réaliser. Afin de surmonter ces difficultés, plusieurs méthodes sont souvent adoptées telles que les méthodes analogiques et les méthodes numériques.

Les méthodes de contrôle MPPT :

- Méthode de courbe d'ajustage (Curve-fitting method)
- Méthode de la table de consultation (Look-up table)
- Méthode de tension en circuit ouvert du générateur PV (Open-circuit voltage photovoltaic generator method)
- Méthode de courant de court circuit du générateur PV (Short circuit current photovoltaic generator method)
- Méthode de perturbation et d'observation (P&O)
- Méthode de conductance incrémentielle

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté : principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque, dans un premier temps, nous avons commencé l'étude par détailler les caractéristiques d'un GPV ; ensuite, une présentation du modèle des éléments constituant la chaîne photovoltaïque avec les implications sur le rendement d'une installation PV de la caractéristique non linéaire de ce générateur sont fournis. Nous avons également montré comment nous pourrions optimiser la puissance fournie par le GPV par des méthodes du point de puissance maximale MPPT.

Introduction

Pour mieux comprendre les mécanismes physiques agissant à l'intérieur de la cellule solaire, et par conséquent les différents paramètres qui affectent ses caractéristiques, plusieurs méthodes ont été proposées pour l'identification de ses paramètres, non seulement pour l'augmentation du rendement de la cellule photovoltaïque, mais aussi pour pouvoir simuler son comportement, et optimiser ses différentes caractéristiques. [11]

On rencontre dans la littérature plusieurs modèles que leurs précisions restent tributaire à la modélisation mathématiques des différents phénomènes physiques intrinsèques intervenant dans le processus de production d'électricité. On trouve plusieurs modèles de quatre (04) jusqu'à sept (07) paramètres basés sur la modélisation mathématique de la courbe courant-tension (I-V). Dans la plupart des travaux de la littérature, on trouve principalement les modèles équivalent à quatre et Cinque paramètres. Dans le modèle à quatre paramètres, l'effet de la résistance shunt (parallèle) est négligé du fait que sa valeur importante et plus particulièrement pour les modules au Si-cristallin.

- Le modèle à Cinque paramètres fait intervenir :
 I_{ph} (le photo-courant), I_s (le courant de saturation), A (le facteur d'idéalité), R_s (la résistance série) et R_{sh} (la résistance parallèle).
- Le modèle à quatre paramètres fait intervenir :
 I_{ph} (le photocourant), I_s (le courant de saturation), A (le facteur d'idéalité) et R_s (la résistance série).

Ces paramètres ne sont pas généralement des quantités mesurables ou incluses dans les données du fabricant. En conséquence, ils doivent être déterminés à partir des systèmes d'équations (I-V) à divers points de fonctionnement donnés par le constructeur ou tirés des essais expérimentaux. [2]

L'objectif de ce chapitre est de comparer les méthodes numériques a quatre et Cinque paramètres les plus utilisées de point de vue caractérisation des cellules solaires à base du Si-cristallin, à savoir: la méthode de la pente, la méthode explicite simplifiée, la méthode de Newton-Raphson et la nouvelle méthode analytique

Les résultats de simulation sont confrontés à ceux des différents constructeurs afin de valoriser les différentes conclusions tirées à propos des différentes méthodes exploitées.

II.1 Modèles électriques d'une cellule solaire :

La modélisation des cellules solaires s'impose comme une étape irréfutable, ce qui a conduit à une diversification dans les modèles électriques proposés par les chercheurs. Une cellule solaire est représentée, dans la littérature, par plusieurs modèles, chacun d'eux est régi par une expression mathématique en fonction des paramètres technologiques de la cellule solaire (courant et tension). Les modèles électriques utilisés dans l'étude et la modélisation des cellules solaires sont le modèle à une diode, et le modèle à deux diodes.

II.1.1 Modèle à une diode :

Ce modèle, vu sa simplification, est le plus utilisé pour l'obtention des paramètres d'une cellule solaire. Suivant le nombre de paramètres, on distingue :

II.1.1.1 Modèle d'extraction à cinq paramètres (simple exponentielle) :

La jonction PN soumise à l'éclairement est schématisée par un générateur de courant en parallèle avec une diode, et délivre un courant I_{ph} . La cellule solaire possède les avantages combinés d'un générateur de courant et d'un générateur de tension. Le circuit équivalent est illustré dans la fig. I.4.

II.1.1.2 Modèle d'extraction à quatre paramètres :

Dans ce modèle, la valeur de la résistance parallèle est supposée infinie. Donc les quatre paramètres apparaissant dans l'équation de la caractéristique I-V sont : I_{ph} , I_s , R_s et A . ce modèle est illustré sur la figure suivante :

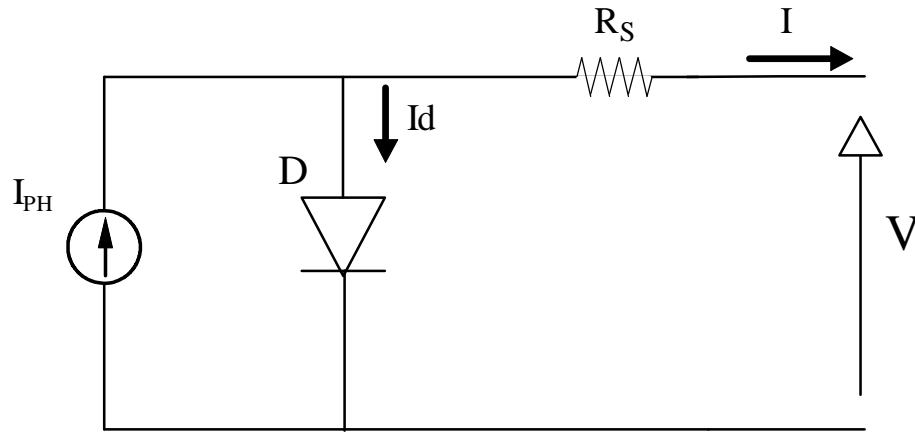


Fig. II.1 Circuit équivalent au modèle à quatre paramètres

II.1.1.3 Modèle d'extraction à trois paramètres (modèle idéal) :

Le modèle idéal est le plus simple des modèles d'une cellule photovoltaïque, il est représenté par une source de courant, qui modélise le courant généré par les photos porteuses, en parallèle avec une diode idéale qui modélise la jonction PN.

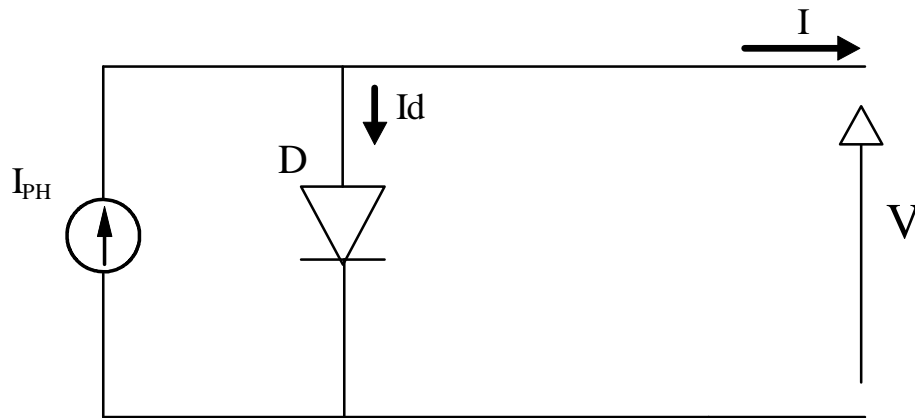


Fig. II.2 Circuit équivalent au modèle à trois paramètres

L'omission de plusieurs paramètres nous amène à la relation décrivant ce modèle déduite de l'équation (I.15) :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{q \cdot V}{N_s \cdot A \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.1})$$

II.1.2 Modèle à deux diodes :

Le modèle double-diodes apporte une meilleure précision tout en rendant la modélisation plus complexe. Les branches de chacune des diodes représentent, respectivement, le courant de diffusion dans la base et l'émetteur et le courant de génération et de recombinaisons dans la jonction. On distingue les trois modèles suivants :

II.1.2.1 Modèle d'extraction à sept paramètres (double exponentielle DEM) :

Ce modèle est dit le plus proche du comportement réel de la cellule solaire, du fait qu'il tient compte du mécanisme de transport des charges électriques à l'intérieur de la cellule solaire (voir Fig. I.6)

L'expression de la caractéristique courant-tension, selon T. Back, F. Hoffmeister, [12], s'écrit :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left(\frac{q(V+R_s I)}{A_1 K T} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(\frac{q(V+R_s I)}{A_2 K T} \right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (II.2)$$

Les deux termes exponentiels représentent, séparément, le courant de saturation de diffusion (I_{s1}) et de saturation de génération-recombinaison (I_{s2}). Les paramètres sont R_{sh} , I_{ph} , I_{s1} , I_{s2} , R_s , A_1 et A_2 .

II.1.2.2 Modèle d'extraction à six paramètres :

La figure ci-dessous schématise le modèle à six paramètres :

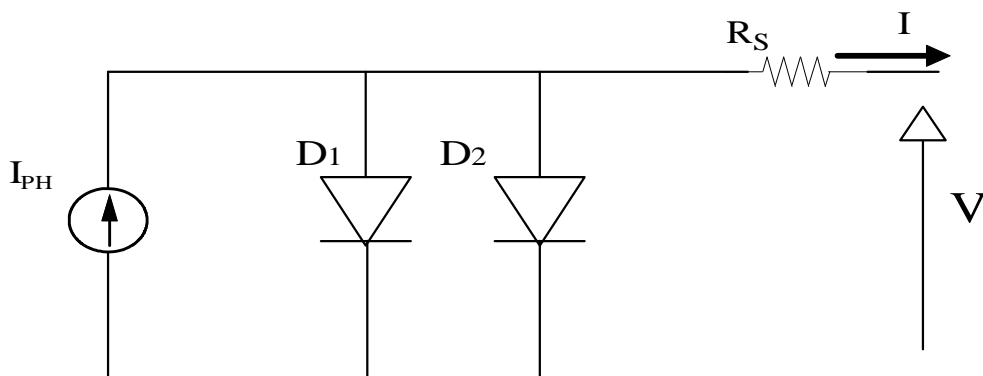


Fig. II.3 Circuit équivalent au modèle à six paramètres

Dans ce modèle la résistance shunt a été omise à l'infinie ce qui donne un courant de fuite nul. La relation I-V de ce circuit est donnée par la formule :

$$I = I_{ph} - I_{s1} \left[\exp \left(\frac{q(V+R_s I)}{A_1 K T} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[\exp \left(\frac{q(V+R_s I)}{A_2 K T} \right) - 1 \right] \quad (II.3)$$

II.2 Méthodes d'extraction :

Plusieurs méthodes ont été développées pour l'extraction des paramètres de la cellule, nous avons exploités les modèles à Quatre et à Cinq paramètres, (modèle à une seule diode).

- Les méthodes à Quatre paramètres :
 - La Méthode explicite simplifiée
 - La Méthode de la pente au point ($V_{co}, 0$)
- Les méthodes à Cinq paramètres :
 - La méthode Newton-Raphson
 - La Nouvelle méthode analytique

II.2.1 Méthodes d'extraction à cinq paramètres :

Dans ces méthodes on prend compte de la résistance parallèle.

Alors l'équation caractérisant le modèle à Cinq paramètres est la suivante :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(q \cdot \frac{(V+R_s I)}{N_s A K T} \right) - 1 \right] - \frac{V+I R_s}{R_{sh}} \quad (II.4)$$

Les Cinq paramètres inconnus dans ce modèle sont :

I_{ph} : le photo- courant [A]

I_s : le courant de saturation [A]

A : le facteur d'idéalité,

R_s : la résistance série [Ω]

R_{sh} : la résistance parallèle [Ω]

II.2.1.1 La méthode Newton-Raphson :

La méthode itérative de Newton-Raphson est exploitée parce qu'elle converge rapidement, particulièrement si l'itération commence suffisamment près de la racine désirée. [13]

L'équation (II.4) en soit ne laissent pas dessiner la courbe (I-V), la dépendance de la température du photo-courant, la connaissance de la résistance série, la résistance parallèle, le facteur d'idéalité, et du courant de saturation est obligatoire pour accomplir le modèle [13]:

Avec :

$$I_{ph}(T) = I_{ph}(T_{ref}) + \alpha(T - T_{ref}) \quad (II.5)$$

$$I_{ph}(T_{ref}) = I_{sc}(T_{ref}) \frac{G}{G_{ref}} \quad (II.6)$$

De l'équation II.4 on a :

$$I_s(T_{ref}) = \frac{I_{sc}(T_{ref})}{\left(e^{\frac{qV_{oc}(T_{ref})}{N_s.A.K.T_{ref}-1}} \right)} \quad (II.7)$$

$$V_{oc}(T) = V_{oc}(T_{ref}) + \beta(T - T_{ref}) \quad (II.8)$$

G : est l'irradiation (W/m^2)

α : Le coefficient d'incrémentation du courant I_{sc} ($A/^{\circ}C$)

β : Le coefficient d'incrémentation de la tension V_{oc} ($V/^{\circ}C$)

Aux conditions d'essai standard (STC) : $T_{ref} = 25^{\circ}C$ et $G_{ref} = 1000 W/m^2$. D'ailleurs le courant de court-circuit $I_{sc}(T_{ref})$ et la tension de circuit ouvert $V_{oc}(T_{ref})$ aux STC sont énoncés par le fabricant ainsi ils sont généralement tous deux connus [14]

Pour accomplir le modèle nous devrions savoir les valeurs de R_{sh} et de R_s . La valeur de R_s a un effet marqué sur la proche de la caractéristique (I-V) de l'état du circuit ouvert, alors que R_{sh} agit sur la tension au point de puissance maximale (MPP).

L'évaluation initiale de ces paramètres, que nous dénotons avec R_{s0} et R_{sh0} , est critique parce qu'un mauvais point de départ peut compromettre la convergence de la méthode de newton-Raphson.

Une méthode pour obtenir une première bonne évaluation de R_s et de R_{sh} a été proposée par Gow [15], et consiste en différenciant (II.4), en l'évaluant aux états de circuit ouvert et en le réarrangeant en termes de R_s . L'équation obtenue est

$$R_{s0} = - \left[\frac{dV}{dI} \Big|_{V=V_{oc}} + \frac{1}{X_V} \right] \quad (II.9)$$

Là où

$$X_V = I_s(T) \cdot \frac{q}{N_s A K T} e^{\left(\frac{qV_{oc}(T)}{N_s A K T} \right)} \quad (II.10)$$

La valeur initiale de R_{sh} provient par évaluation de l'équation (II.4) aux états de MPP en utilisant la valeur de R_{s0} précédemment estimée

$$R_{sh0} = \frac{-V_{MP} - R_{s0} I_{MP}}{I_{MP} - I_{ph} + I_s \left(e^{\frac{q(V_{MP} + R_{s0} I_{MP})}{N_s A K T}} + 1 \right)} \quad (II.11)$$

Il vaut la peine d'accentuer que R_s et R_{sh} ne sont pas affectées par irradiante mais seulement par des caractéristiques physiques de la cellule.

Le facteur d'idéalité A , en exploitant le fait que la dérivée de la puissance maximale est nulle ($d_p/d_v = 0$),

$$\frac{dp}{dv} = 0 = \frac{\partial I}{\partial V} V + I \frac{\partial V}{\partial V} \quad (II.12)$$

On trouve,
$$A = \frac{q(2V_m - V_{co})}{N_s K T \left[\frac{I_{cc}}{I_{cc} - I_m} + \ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}} \right) \right]} \quad (II.13)$$

II.2.1.2 Nouvelle méthode analytique :

Cette nouvelle méthode analytique calcule facilement les paramètres du circuit équivalent en se basant sur des données que les fabricants fournissent habituellement. L'approximation analytique est basée sur une nouvelle méthodologie, puisque les méthodes développées jusqu'ici pour obtenir les paramètres mentionnés sur la (fig. I.4) du circuit équivalent, et les données du fabricant ont toujours été numériques ou heuristiques. Les résultats de la méthode actuelle sont aussi précis que ceux qui résultent d'autres méthodes existantes (numériques) plus complexes en termes de processus et ressources de calcul. [16]

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(\frac{V + IR_s}{N_s A V_T} - 1 \right) \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (II.14)$$

Là où I_s est le courant de saturation de la diode, A est le facteur d'idéalité qui tient compte de la déviation de la diode de la théorie de diffusion de Shockley [16], N_s est le nombre de cellule en série. En conclusion, V_T est la tension thermique de la diode, une constante qui dépend de la température T , la constante de Boltzmann K , et les charges de l'électron q , avec l'équation:

$$V_T = \frac{N_s K T}{q} \quad (II.15)$$

Le modèle de circuit équivalent sur (fig. I.4) contient cinq paramètres inconnus: I_{ph} , R_s , R_{sh} , I_s et A .

Le facteur d'idéalité A , en exploitant le fait que la dérivée de la puissance maximale est nulle ($d_p/d_v = 0$),

$$\frac{dp}{dv} = 0 = \frac{\partial I}{\partial V} V + I \frac{\partial V}{\partial V} \quad (II.16)$$

On trouve,
$$A = \frac{q(2V_m - V_{co})}{Ns.K.T \left[\frac{I_{cc}}{I_{cc} - I_m} + \ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}}\right) \right]} \quad (II.17)$$

Détermination du courant de court circuit :

L'équation (II.4) au point de court circuit peut être réécrite comme suite:

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{(I_{cc} \cdot R_s)}{AV_T} - 1\right) \right] - \frac{I_{cc} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (II.18)$$

Après simplification [17-19] on obtient l'équation suivant:

$$I_{ph} = \frac{R_{sh} + R_s}{R_{sh}} I_{cc} \quad (II.19)$$

•En outre, au point de circuit ouvert, l'équation (II.12) peut être réécrite comme suite:

$$0 = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{AV_T} - 1\right) \right] - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (II.20)$$

Cela, en utilisant (II.15), peut être simplifié [20,21]:

$$I_s = \frac{I_{sc}}{\left(\frac{qV_{oc}}{eNs.A.K.T} - 1 \right)} \quad (II.21)$$

•En conclusion, l'équation (II.12) peut être dérivée, au point de puissance maximum :

$$I_{mpp} = I - I_s \left[\exp\left(\frac{(V_{mpp} + R_s \cdot I_{mpp})}{AV_T} - 1\right) \right] - \frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s}{R_{sh}} \quad (II.22)$$

Cela, en utilisant (II.15) et (II.17), peut être simplifié:

$$I_{mpp} = I_{cc} - \left(I_{cc} \frac{V_{oc} - R_s I_{cc}}{R_{sh}} \right) \left[\exp\left(\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s - V_{oc}}{AV_T}\right) \right] - \frac{V_{mpp} + I_{mpp} - I_{cc} R_s}{R_{sh}} \quad (II.23)$$

•L'état du dérivé zéro pour la puissance au point maximum de puissance peut être mathématiquement exprimé comme [18]:

$$\left(\frac{\partial I}{\partial V} \right) \Big|_{[I_{mpp}, V_{mpp}]} = - \frac{I_{mpp}}{V_{mpp}} \quad (II.24)$$

En utilisant l'état ci-dessus en (II.12), présentant (II.15), (II.17) et (II.19) et puis la simplification, il est possible d'obtenir:

$$\frac{AV_T V_{mpp} (2I_{mpp} I_{cc})}{(V_{mpp} I_{cc} + V_{oc}(I_{mpp} - I_{cc}))(V_{mpp} - I_{mpp} R_s) - AV_T (V_{mpp} I_{cc} - V_{oc} I_{mpp})} = \exp\left(\frac{V_{mpp} + I_{mpp} R_s - V_{oc}}{AV_T}\right) \quad (II.25)$$

En conclusion, de (II.19) et de (II.21) une expression plus commode de la résistance parallèle R_{sh} peut être dérivée:

$$R_{sh} = \frac{(V_{mpp} - I_{mpp} R_s)(V_{mpp} - R_s(I_{cc} - I_{mpp}) - AV_T)}{(V_{mpp} - I_{mpp} R_s)(I_{cc} - I_{mpp}) - AV_T} \quad (II.26)$$

R_s La résistance série on la calcule par la méthode numérique de Newton-Raphson, car la relation (II.21) est une relation non linéaire.

Donc après simplification on obtient la relation suivant :

$$R_s = - \left[\frac{dV}{dI} \Big|_{V=V_{oc}} + \frac{1}{X_V = I_s \frac{1}{A \cdot V_T} e^{\frac{V_{oc}}{A \cdot V_T}}} \right] \quad (II.27)$$

II.2.2 Méthodes d'extraction à quatre paramètres :

On néglige l'effet de la résistance parallèle car sa valeur est importante.

Alors l'équation caractérisant le modèle à quatre paramètres est la suivante : [22,23]

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(q \cdot \frac{(V + R_s \cdot I)}{N_s \cdot A \cdot K \cdot T} - 1 \right) \right] \quad (II.28)$$

K : la constante du Boltzmann ($1.38 \cdot 10^{-23}$ j/K)

q : la charge d'électron ($1.6 \cdot 10^{-19}$ c)

Les quatre paramètres inconnus dans ce modèle sont :

I_{ph} : le photo- courant [A]

I_s : le courant de saturation [A]

A : le facteur d'idéalité

R_s : la résistance série [Ω]

Ces paramètres sont à déterminer à partir de la mesure de la caractéristique I-V pour un couple d'éclairement et température de référence (G_{ref} , T_{ref}), donné aux STC ("Standard Test Conditions", 1000 W/m^2 , $25 \text{ }^\circ\text{C}$, spectre AM1.5) par le constructeur. Ou issus de la mesure directe sur le module.

Ces mesures sont indispensables afin de spécifier les données de base nécessaires pour la caractérisation des différents paramètres du modèle (les 4 valeurs : tension de circuit ouvert V_{co} ,

courant de court-circuit du module I_{cc} , tension et courant au point de puissance maximale I_{mp} , V_{mp}).

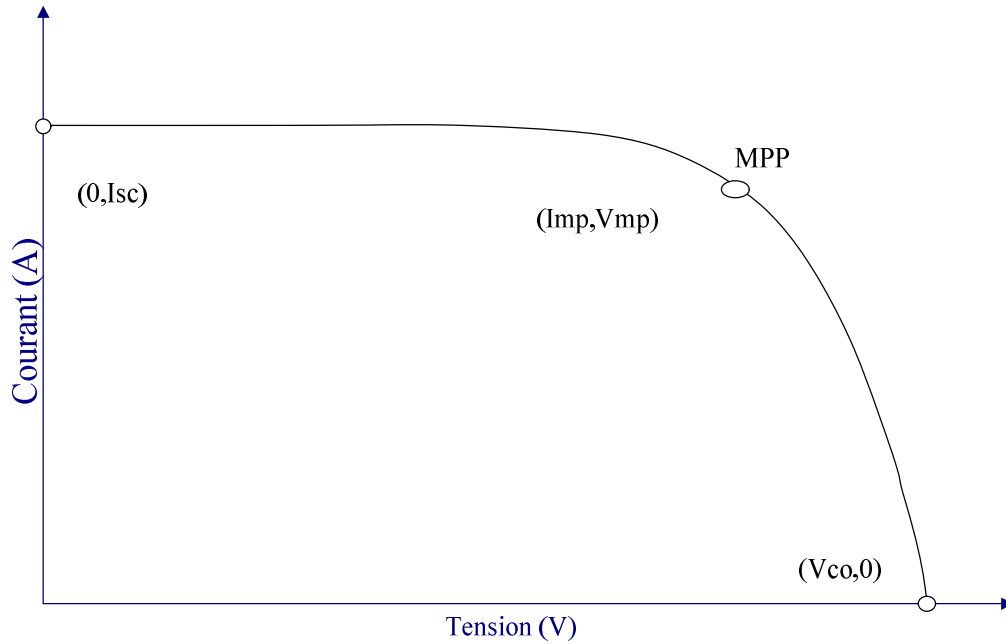


Fig. (II.4) : Caractéristique I(V)

Trois points remarquables de la caractéristique (I-V) : $(0, I_{cc})$, $(V_{oc}, 0)$ et (V_{mp}, I_{mp}) [24], peuvent être employés pour déterminer les quatre paramètres inconnus (I_{ph}, I_s, A, R_s) , où:

- Au point $(0, I_{cc})$

$$I_{cc} = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(q \cdot \frac{I_{cc} \cdot R_s}{N_s \cdot A \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (II.29)$$

- Au point $(V_{oc}, 0)$

$$0 = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(q \cdot \frac{V_{co}}{N_s \cdot A \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (II.30)$$

- Au point (V_{mp}, I_{mp})

$$I_m = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(q \cdot \frac{(V_m + I_m \cdot R_s)}{N_s \cdot A \cdot K \cdot T} \right) - 1 \right] \quad (II.31)$$

En observant ces équations il est évident que nous sommes devant un problème de quatre inconnus et trois équations, cela crée une diversification dans le choix de l'équation additionnel à ajouter. Ce qui nous amène devant une dizaine de méthodes de résolution citées dans la littérature, avec une précision variable d'une méthode à un autre. [25,26].

II.2.2.1 Méthode explicite simplifiée :

Pour calculer les paramètres du panneau, quelques simplifications ont été faites sur l'équation (I.15). Car le courant de saturation dans des dispositifs de silicium (comparés à la limite exponentielle) est très petit, le terme ' - 1 ' peut être négligé [27]. Une autre simplification, qui a été faite afin d'obtenir des équations relativement simples et traitables rapproche le photo-courant produit I_{ph} avec ($I_{ph} \approx I_{cc}$). Il est dans des habitudes courants d'ignorer la différence entre le photo-courant produit et le courant de court-circuit, car elle est généralement négligeable [27], dans ce cas (I.15) devient:

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(q \cdot \frac{(V + R_s I)}{N_s A K T} \right) \right] \quad (II.32)$$

Donc : $I_{ph} = I_{cc} \quad (II.33)$

$$0 = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(q \cdot \frac{V_{co}}{N_s A K T} \right) \right] \quad (II.34)$$

$$I_m = I_{ph} - I_s \left[\exp \left(q \cdot \frac{(V_m + I_m R_s)}{N_s A K T} \right) \right] \quad (II.35)$$

De la relation (II.29), on peut déduire le courant de saturation I_s

$$I_s = I_{cc} \left[\exp \left(-q \cdot \frac{V_{co}}{N_s A K T} \right) \right] \quad (II.36)$$

On remplace l'équation (II.31) dans l'équation (II.27) on peut la réécrire comme suit :

$$I = I_{cc} \left[1 - \exp \left(q \cdot \frac{V - V_{co} + I R_s}{N_s A K T} \right) \right] \quad (II.37)$$

L'équation au point de la puissance maximale, devient

$$I_m = I_{cc} \left[1 - \exp \left(q \cdot \frac{V_m - V_{co} + I_m R_s}{N_s A K T} \right) \right] \quad (II.38)$$

A partir de cette équation, on peut tirer la valeur de la résistance série R_s explicitée par:

$$R_s = \frac{N_s A K T \ln \left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}} \right) + V_{co} - V_m}{I_m} \quad (II.39)$$

Le dernier paramètre à déterminer est le facteur d'idéalité A, en exploitant le fait que la dérivée de la puissance maximale est nulle ($d_p/d_v = 0$), et en utilisant l'équation (II.24) et la formulation suivante:

$$\frac{dp}{dv} = 0 = \frac{\partial I}{\partial V} V + I \frac{\partial V}{\partial V} \quad (\text{II.40})$$

On trouve,
$$A = \frac{q(2V_m - V_{co})}{N_s.K.T \left[\frac{I_{cc}}{I_{cc} - I_m} + \ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{cc}}\right) \right]} \quad (\text{II.41})$$

A partir de l'équation (II.30), on peut tirer la valeur de photo courant par :

$$I_{ph} = I_s \left[\exp\left(q \cdot \frac{V_{co}}{N_s.A.K.T}\right) \right] \quad (\text{II.42})$$

La substitution des différents paramètres par leurs formules respectives, dans l'équation (II.24) donne une équation simple reliant le courant I et V aux différentes températures et ensoleillements.

II.2.2.2 Méthode de la pente au point ($V_{co}, 0$) :

La différence apportée par cette méthode par rapport la méthode précédente est principalement dans la manière de calcul de la résistance série R_s [27]. Elle est basée sur le fait que la résistance série influe remarquablement sur la pente de la courbe caractéristique (I-V) au voisinage du point ($V_{co}, 0$). Donc afin de calculer R_s , on dérive l'équation (II.24) afin d'obtenir:

$$\frac{dI}{dV} = -I_s \left[\left(\exp\left(q \cdot \frac{V + I.R_s}{N_s.A.K.T}\right) - 1 \right) \right] \frac{q}{N_s.A.K.T} \left(1 + R_s \frac{dI}{dV} \right) \quad (\text{II.43})$$

Ce qui donne au point ($V_{co}, 0$):

$$R_s = - \left. \frac{dV}{dI} \right|_{V_{co}} + \frac{1}{\frac{I_s q}{N_s.A.K.T} \exp\left(\frac{q V_{co}}{N_s.A.K.T}\right)} \quad (\text{II.44})$$

La pente M dans le point V_{co} est donnée par $M = \frac{dV}{dI}$ ($I = 0$). Cette valeur est déduite à partir des résultats expérimentaux (Fig. II.1).

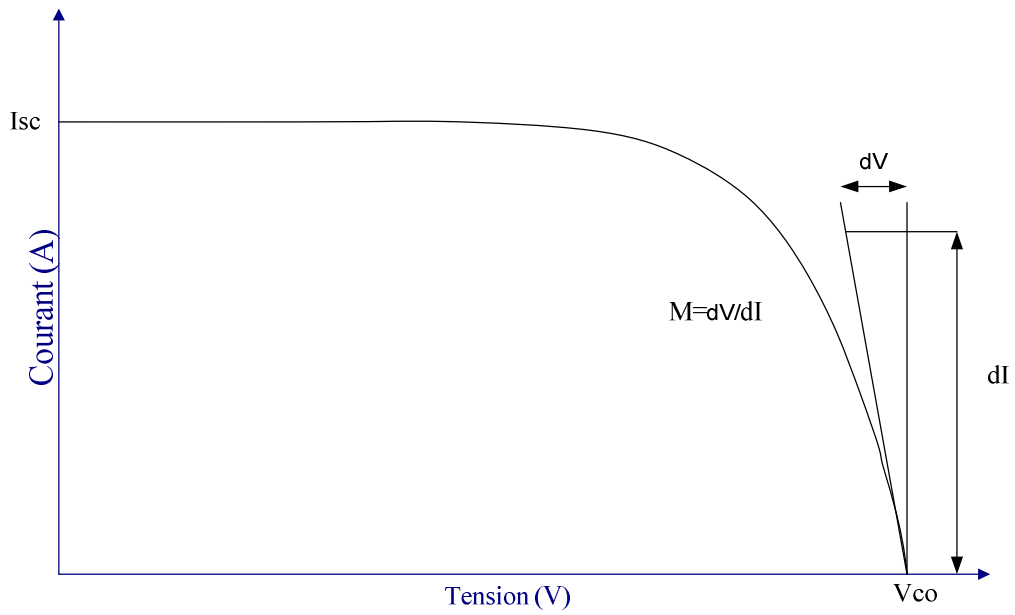


Fig. (II.5) : Le calcul de pente au point de tension de circuit ouvert

Le facteur d'idéalité "A " est déterminé par des méthodes itératives comme la méthode de Newton-Raphson, en vérifiant la concordance entre les résultats de simulation et ceux du fabricant aux conditions de mesure standard

Conclusion :

Dans ce chapitre, les différents modèles électriques d'une cellule photovoltaïque sont exposés. On a mis en évidence l'intérêt que présente le modèle à une exponentielle pour la compréhension des différents phénomènes physiques existant au sein de la cellule solaire.

L'extraction d'une manière optimale des différents paramètres de la cellule est un problème d'une grande importance.

Nous avons aussi donné un aperçu sur les méthodes utilisées. Nous avons également décrit les méthodes appliquées pour l'extraction des paramètres photovoltaïques des cellules solaires qui nous ont semblé les plus importantes et les plus utilisées.

Introduction

La détermination des paramètres électriques d'une cellule solaire, à partir de la caractéristique $I(v)$ décrivant son fonctionnement, joue un rôle important dans la conception et la fabrication des cellules, ainsi ceci permet d'obtenir des informations sur les mécanismes de transport électrique. Toutefois, la détermination précise de ces paramètres reste un challenge pour les chercheurs, ce qui a conduit à une diversification dans les modèles et les méthodes numériques dédiées à leurs caractéristiques.

L'objectif principal de notre travail consiste à extraire les paramètres électriques d'une cellule solaire avec le modèle électrique considéré qui est celui à une seule diode, à cet effet, quatre méthodes sont appliquées

III.1 Méthodes d'extraction proposées

Les méthodes proposées et appliquées dans ce travail servent à extraire les paramètres électriques de la cellule solaire en exploitant le modèle électrique à une seule exponentielle.

III.1.1 Méthode Newton-Raphson :

III.1.1.1 L'Organigramme :

L'organigramme ci-dessous résume les différentes équations utilisées pour l'extraction des paramètres de la cellule photovoltaïque.

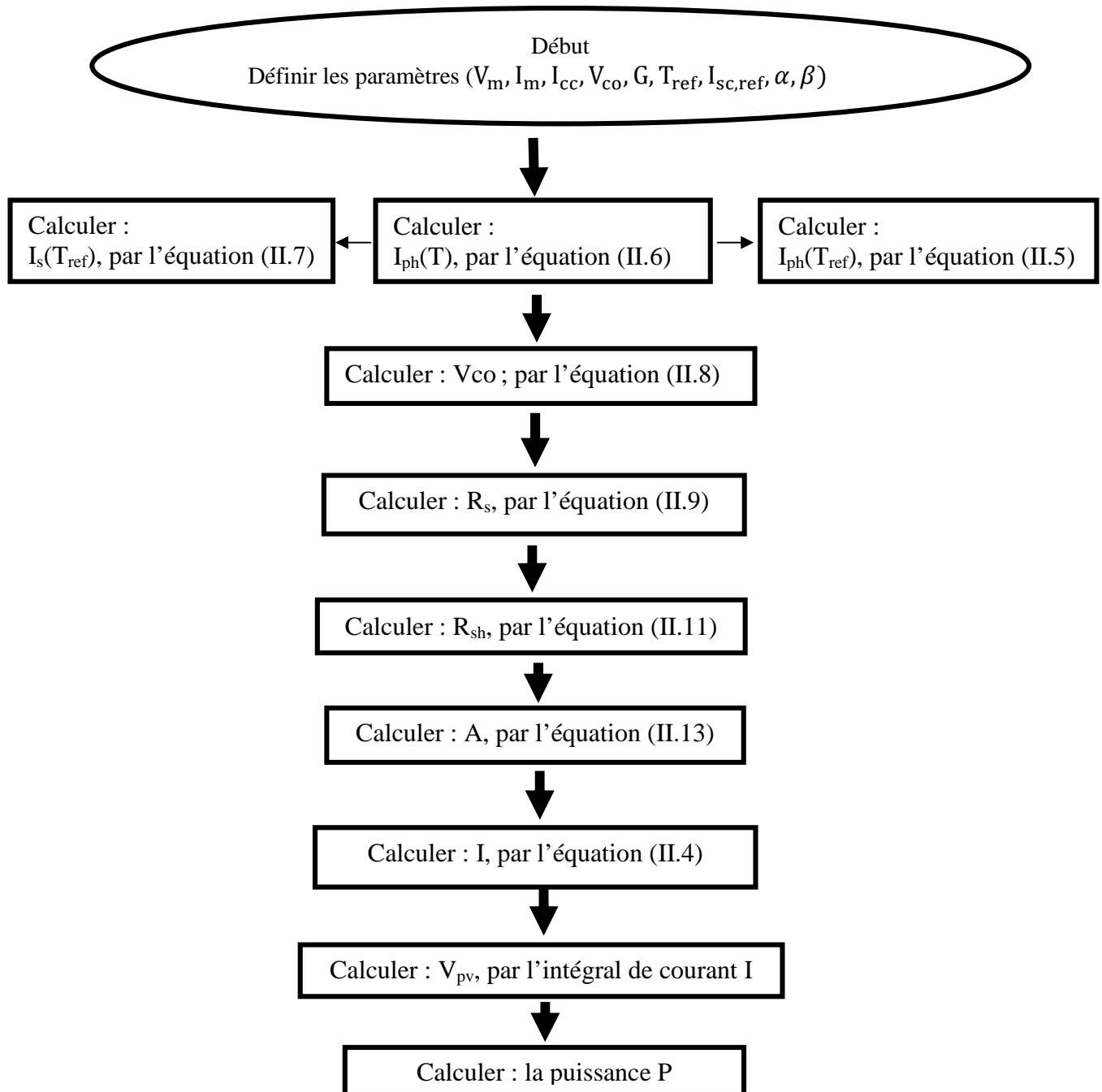


Fig. III.1 Organigramme de la méthode de newton- Raphson

III.1.1.2 Bloc de simulation :

La figure ci-dessous représente le bloc de simulation qu'on a modélisé, par Matlab-simulink pour la méthode de newton- Raphson

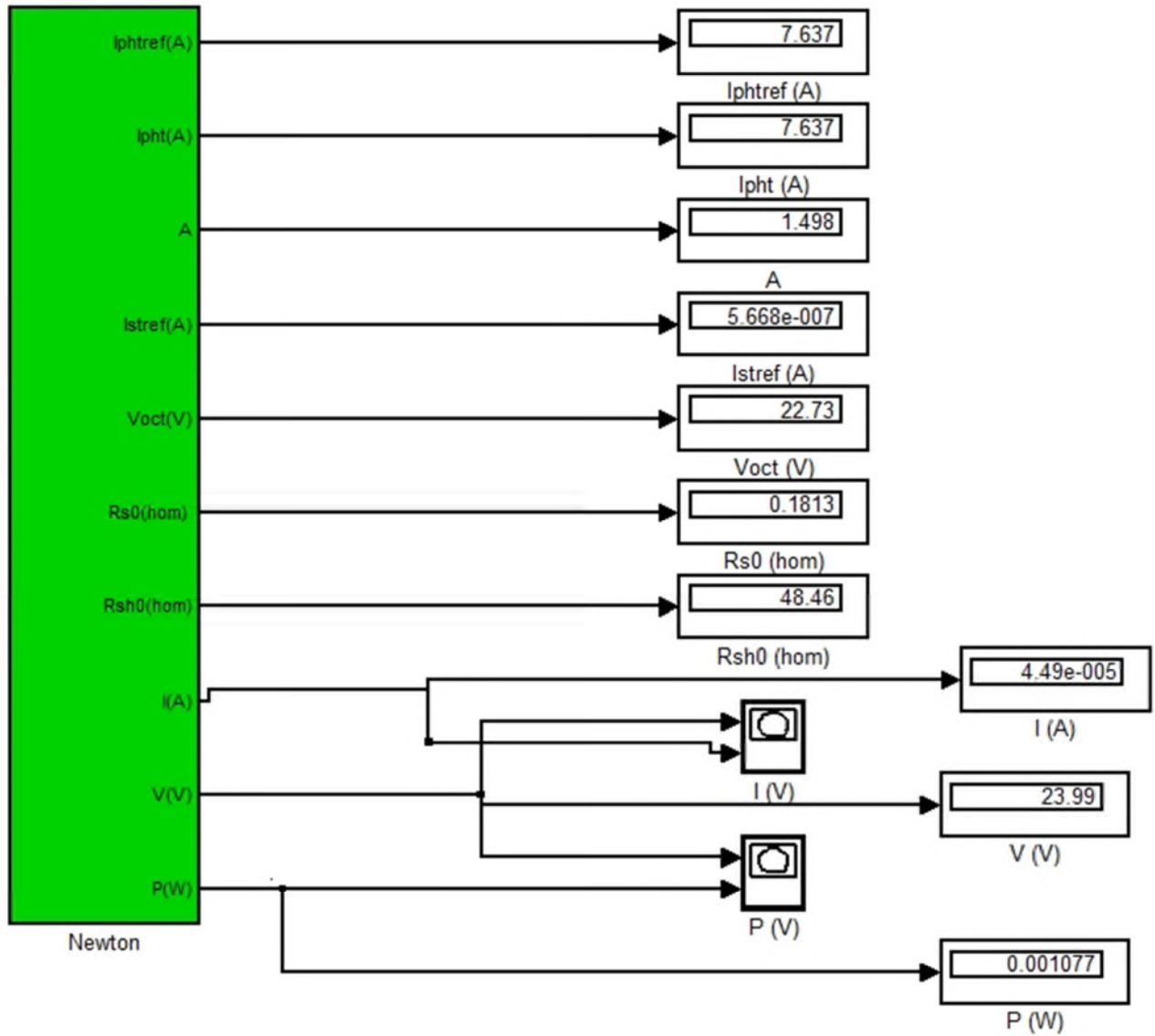


Fig.III.2 Bloc de simulation de la méthode de newton-raphson

➤ **Le schéma interne :**

La figure suivante présente le schéma interne du bloc de simulation.

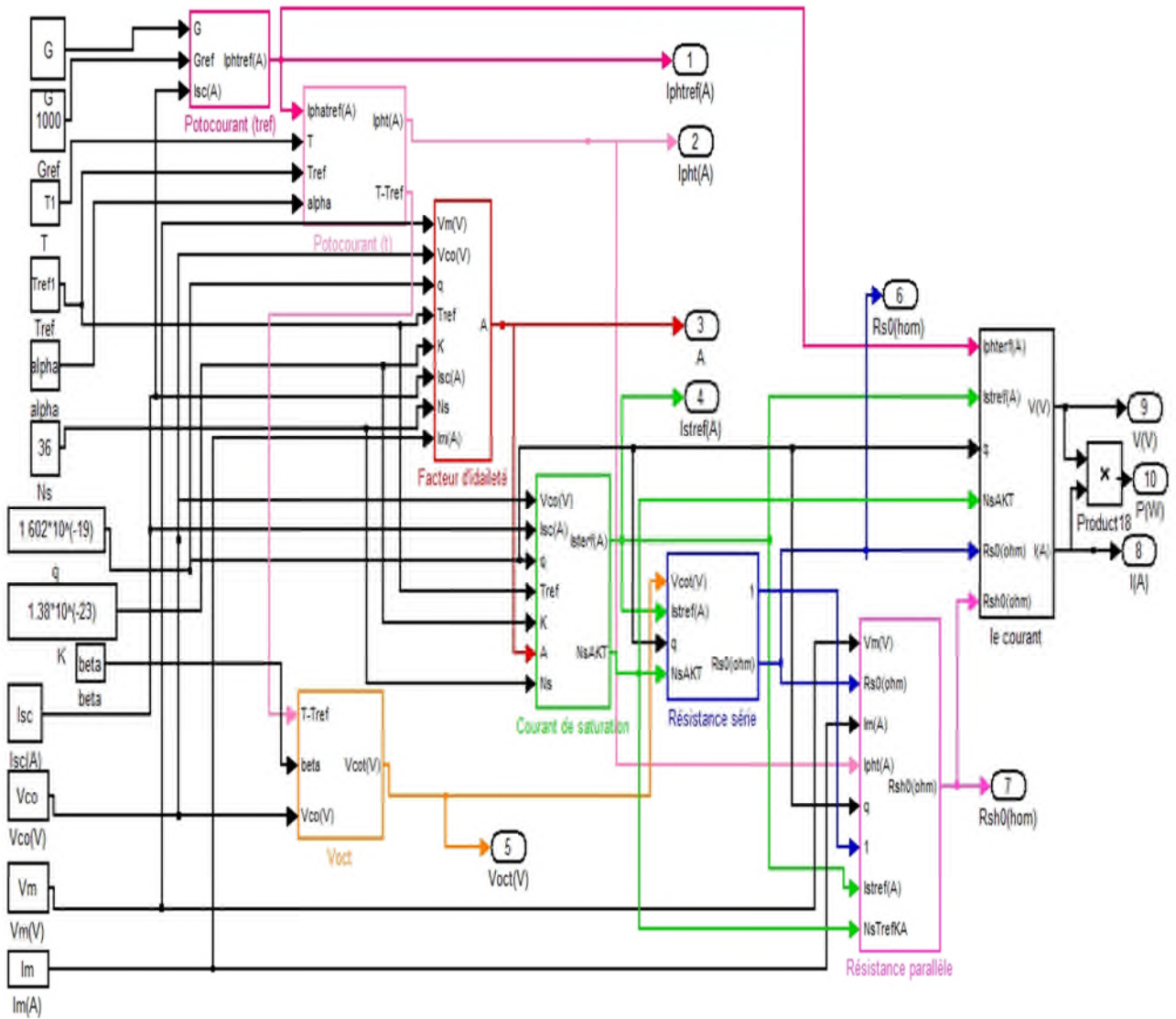


Fig.III.3 schéma interne de la méthode de newton-raphson

III.1.1.3 Résultats :

Le tableau III.1 représente les résultats des cinq paramètres photovoltaïques qu'on a obtenus avec Matlab-simululik, pour le panneau de CONDOR S/N : CEM201408180141_52.

$I_{ph}(A)$	$I_s(A)$	$R_s(\Omega)$	$R_{sh}(\Omega)$	A
7.637	$5.668 \cdot 10^{-7}$	0.1813	48.46	1.498

TAB III.1 Résultats des paramètres d'extractions de la méthode newton-raphson

-La fig.III.4 et la fig.III.5 représente respectivement la caractéristique I(V) et la caractéristique P(v), générée avec les paramètres extraits pour un module solaire.

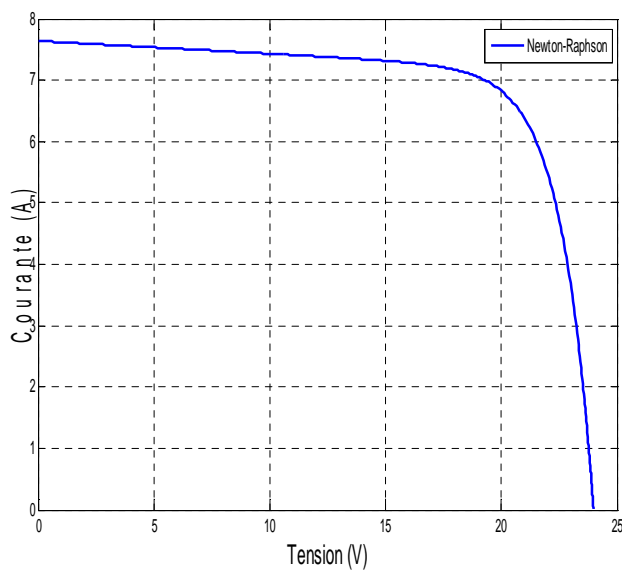


Fig III.4 : Caractéristique I(V)

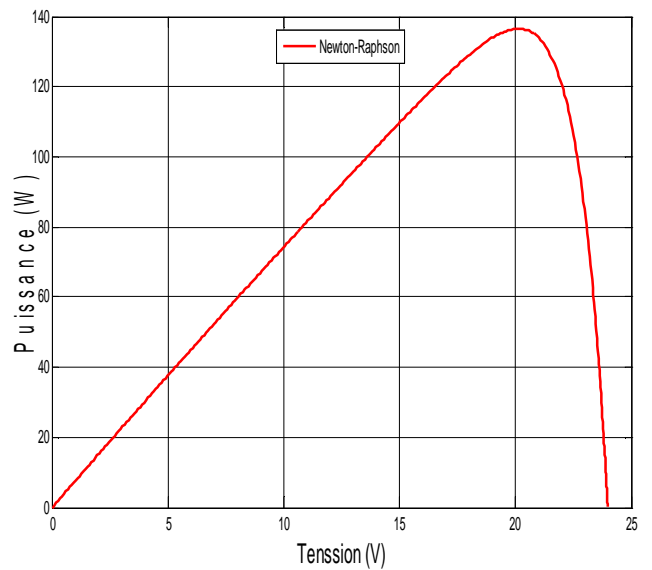


Fig III.5 : Caractéristique P(V)

III.1.2 Nouvelle méthode analytique :

III.1.2.1 L'Organigramme :

L'organigramme ci-dessous résume les différentes équations utilisées pour l'extraction des paramètres de la cellule photovoltaïque.

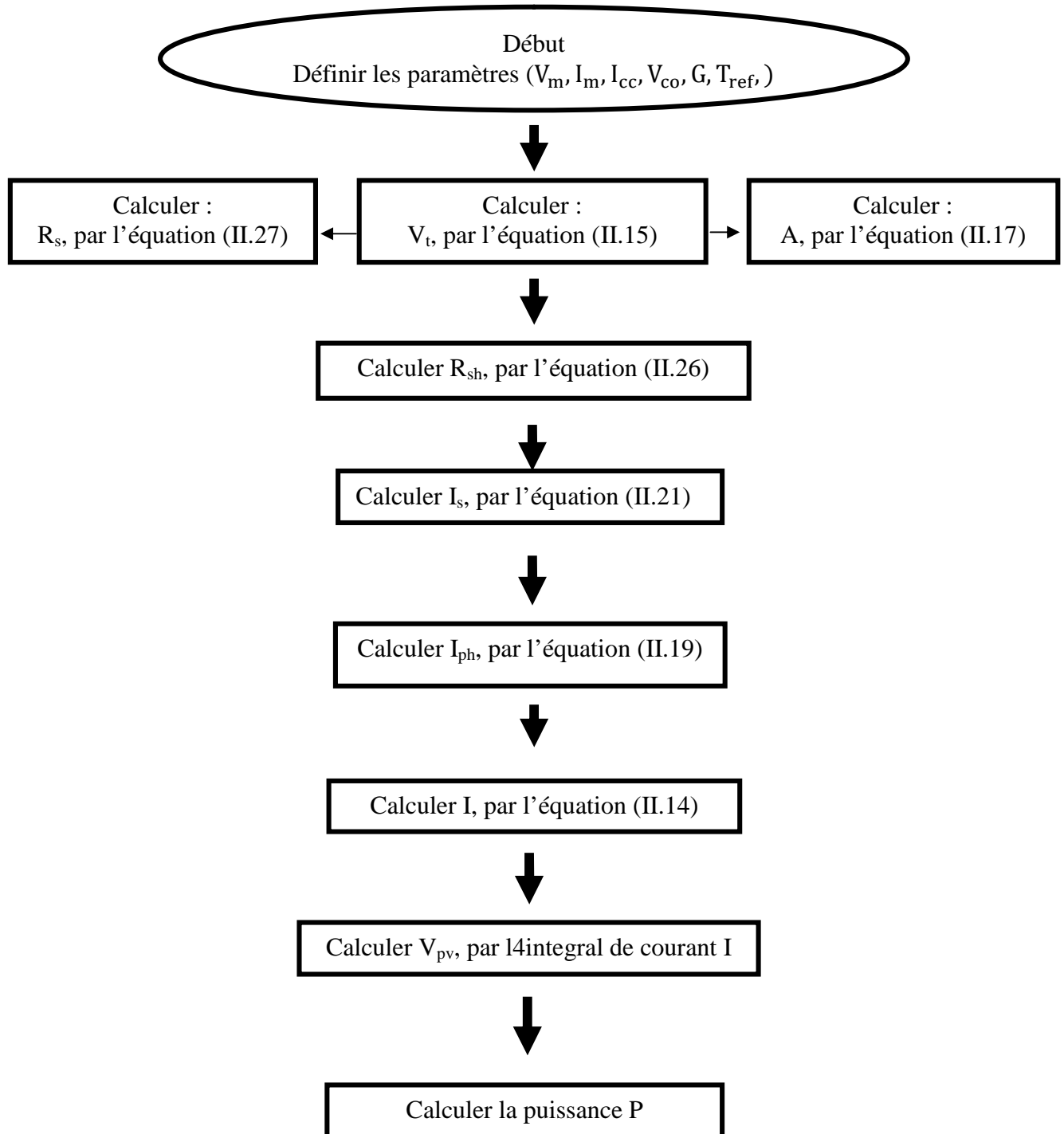


Fig III.6 Organigramme de la nouvelle méthode analytique

III.1.2.2 Bloc de simulation :

La figure ci-dessous représente le bloc de simulation qu'on a modélisé, par Matlab-simulink pour la nouvelle méthode analytique

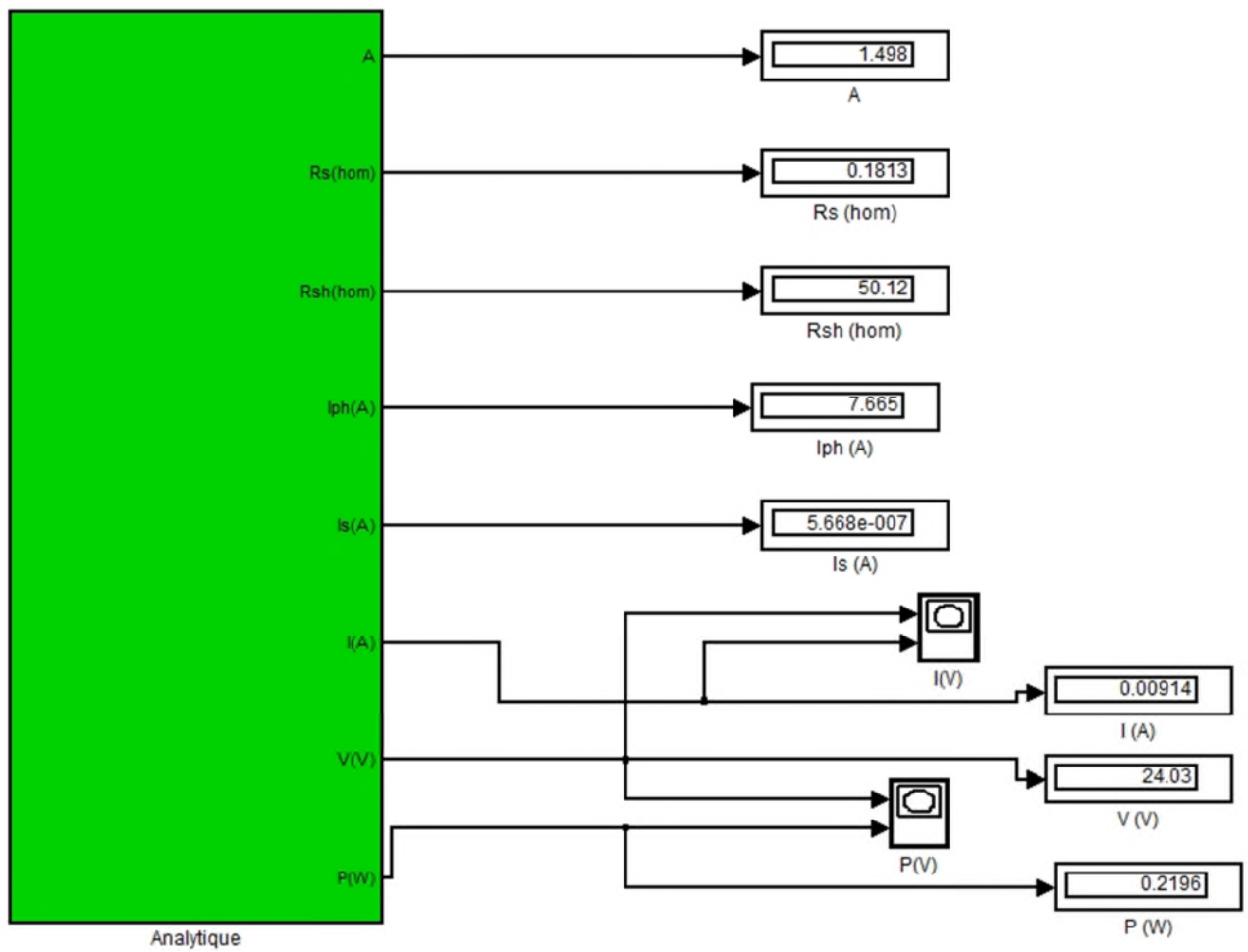


Fig.III.7 Bloc de la nouvelle méthode analytique

➤ **Le schéma interne :**

La figure suivante présente le schéma interne du bloc de simulation de la nouvelle méthode analytique

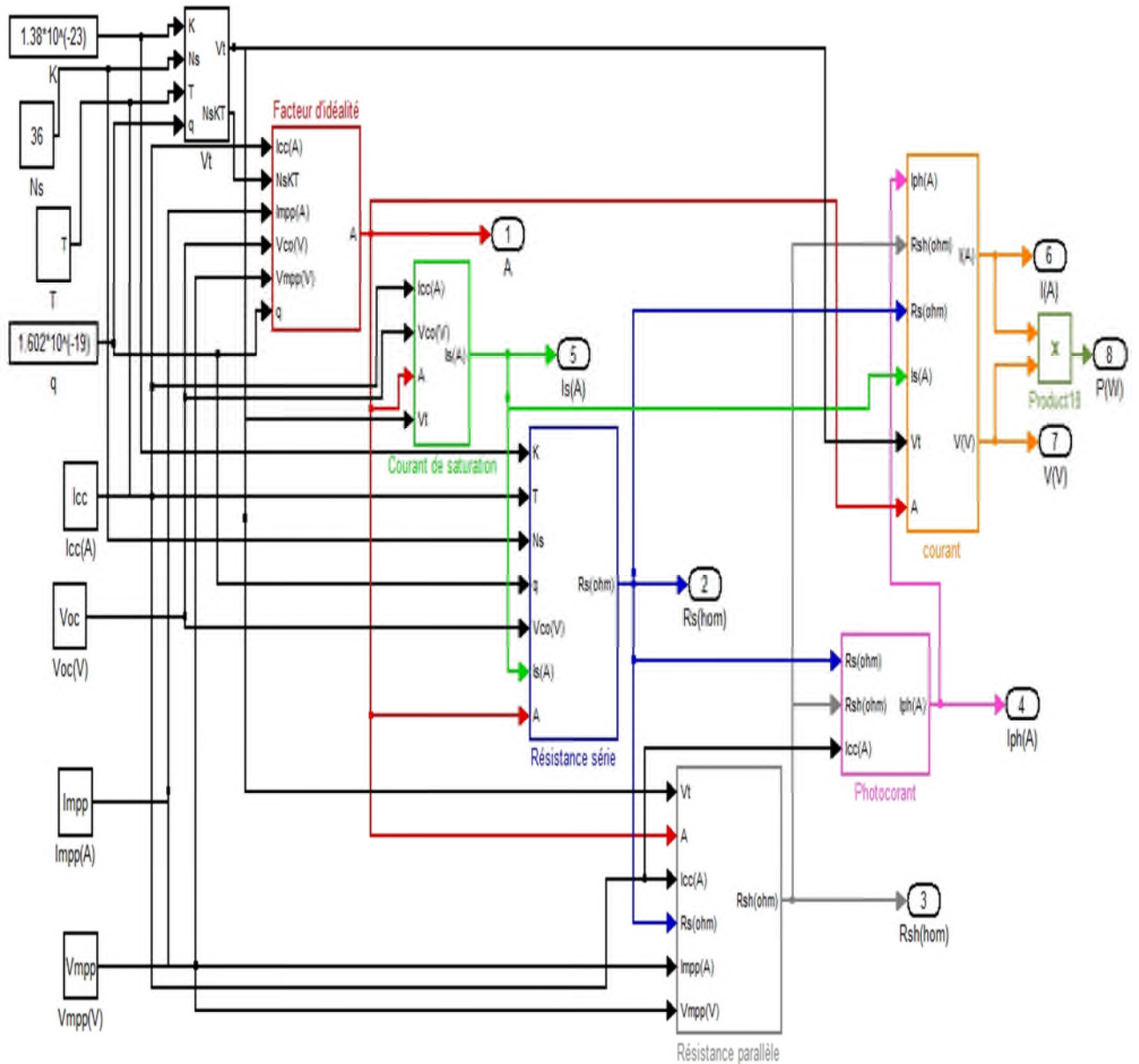


Fig.III.8 schéma interne de la nouvelle méthode analytique

III.1.2.3 Résultats :

Le tableau III.2 représente les résultats des cinq paramètres photovoltaïques qu'on a obtenus avec Matlab-simululik, pour le panneau de CONDOR S/N : CEM201408180141_52.

$I_{ph}(A)$	$I_s(A)$	$R_s (\Omega)$	$R_{sh} (\Omega)$	A
7.665	$5.668 \cdot 10^{-7}$	0.1813	50.12	1.498

TAB III.2 Résultats des paramètres d'extractions de la nouvelle méthode analytique

-La fig.III.9 et la fig.III.10 représente respectivement la caractéristique I(V) et la caractéristique P(v), générée avec les paramètres extraits pour un module solaire.

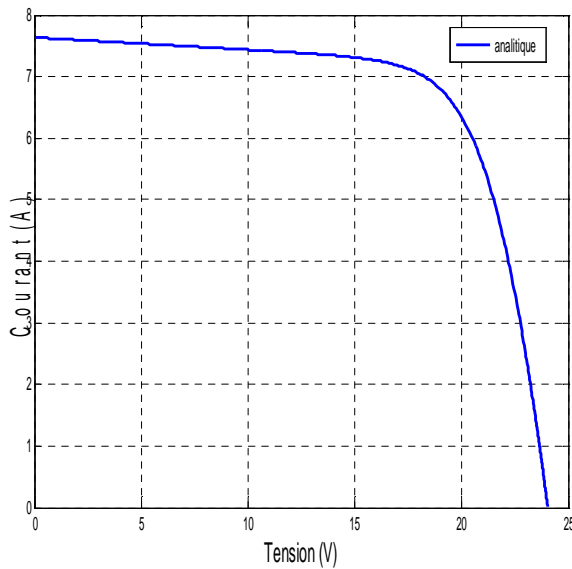


Fig III.9 : Caractéristique I(V)

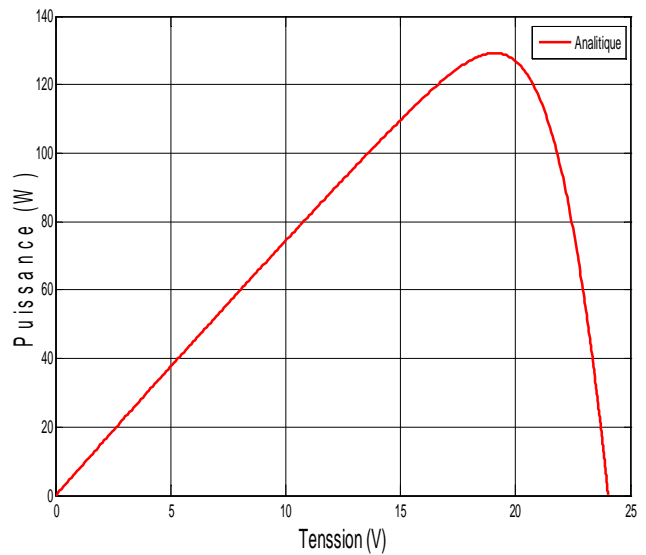


Fig III.10 : Caractéristique P(V)

III.1.3 Méthode explicite simplifiée :

III.1.3.1 L'Organigramme :

L'organigramme ci-dessous résume les différentes équations utilisées pour l'extraction des quatre paramètres de la cellule photovoltaïque.

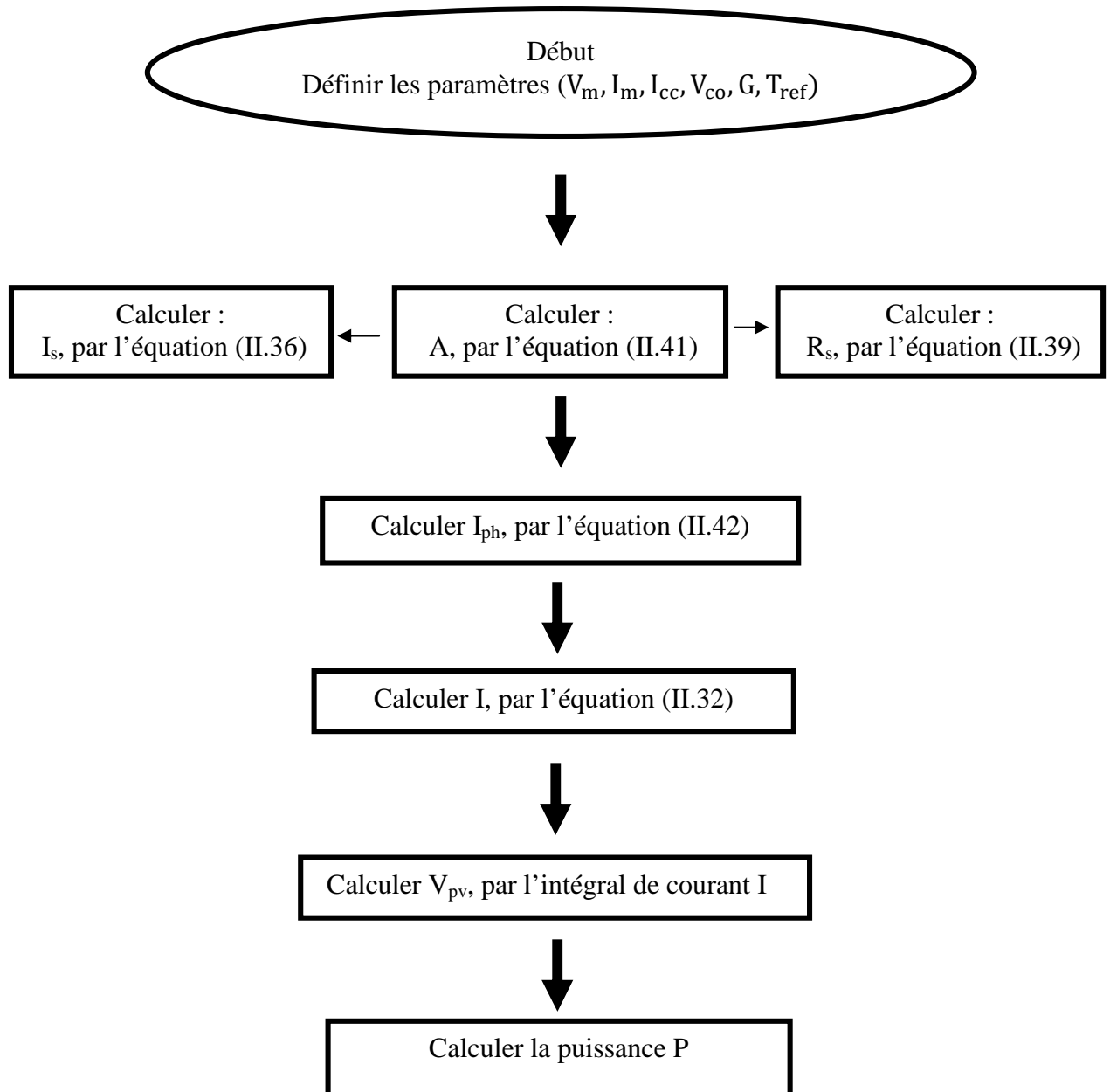


Fig III.11 Organigramme de la méthode explicite simplifiée

III.1.3.2 Bloc de simulation:

La figure ci-dessous représente le bloc de simulation qu'on a modélisé, par Matlab-simulink. Pour la méthode explicite simplifiée

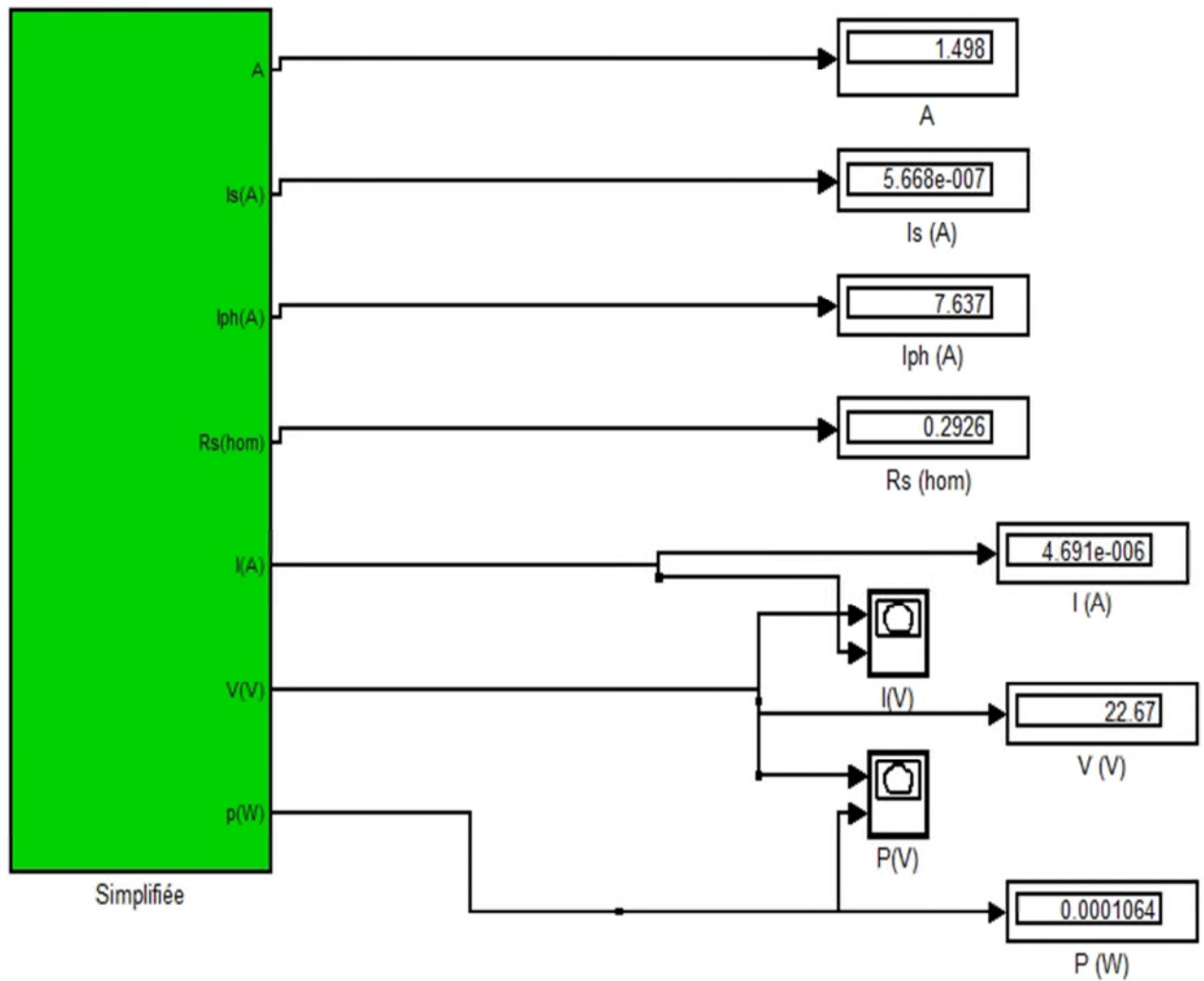


Fig.III.12 Bloc de la méthode explicite simplifiée

➤ **Le schéma interne :**

La figure suivante présente le schéma interne du bloc de simulation de la méthode explicite simplifiée

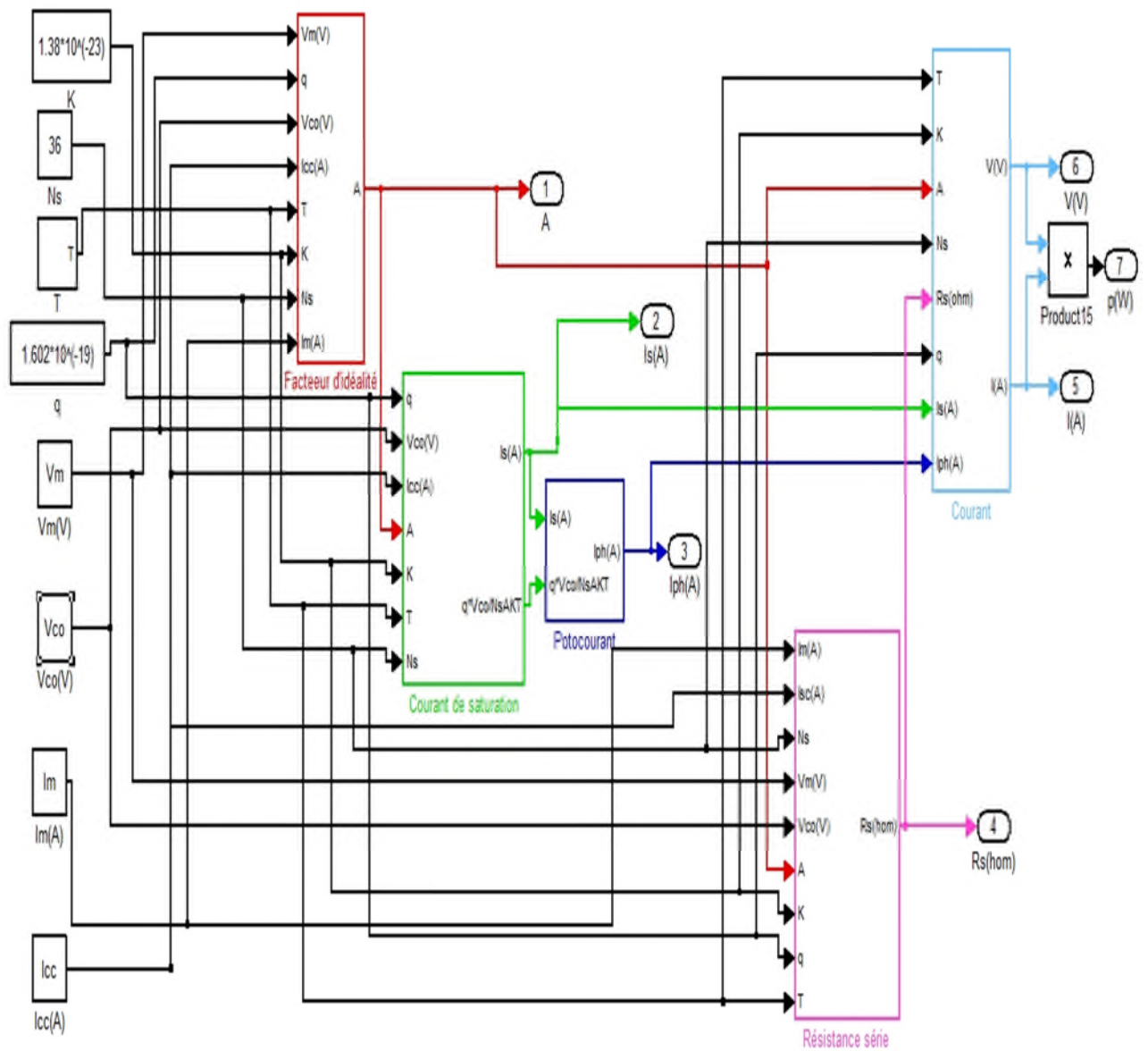


Fig.III.13 schéma interne de la méthode explicite simplifiée

III.1.3.3 Résultats :

Le tableau III.3 représente les résultats des cinq paramètres photovoltaïques qu'on a obtenus avec Matlab-simululik, pour le panneau de CONDOR S/N : CEM201408180141_52.

$I_{ph}(A)$	$I_s(A)$	$R_s(\Omega)$	A
7.637	$5.668 \cdot 10^{-7}$	0.2926	1.498

TAB III.3 Résultats des paramètres d'extractions de la méthode explicite simplifiée

-La fig.III.14 et la fig.III.15 représente respectivement la caractéristique I(V) et la caractéristique P(V), générée avec les paramètres extraits pour un module solaire.

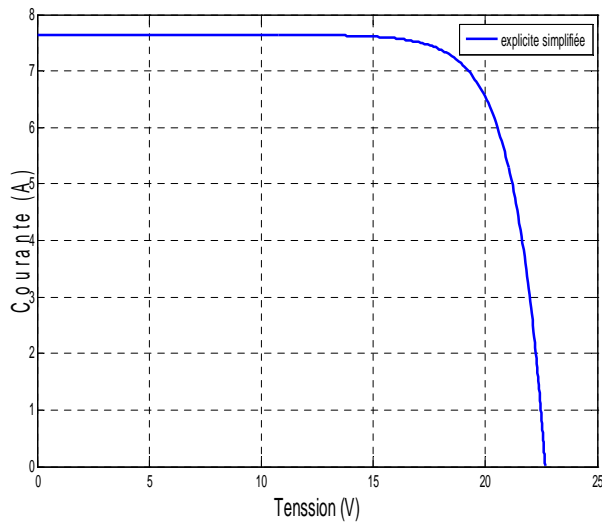


Fig III.14 : Caractéristique I(V)

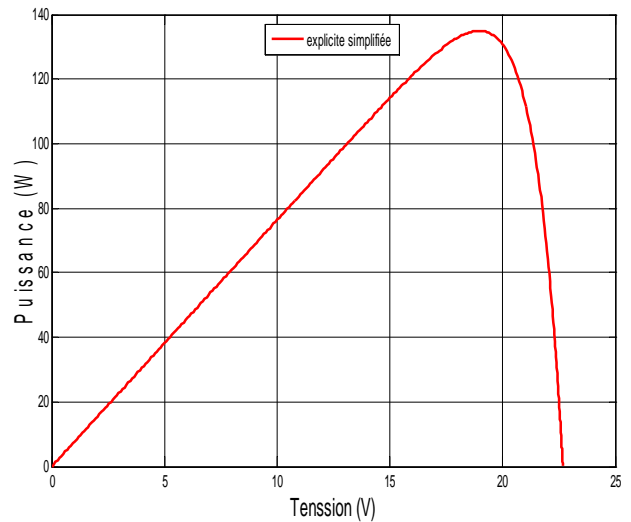


Fig III.15 : Caractéristique P(V)

III.1.4 Méthode de la pente au point ($V_{co}, 0$) :

III.1.4.1 L'organigramme :

La figure suivante représente l'organigramme qu'on a pu générer pour la modélisation de la méthode.

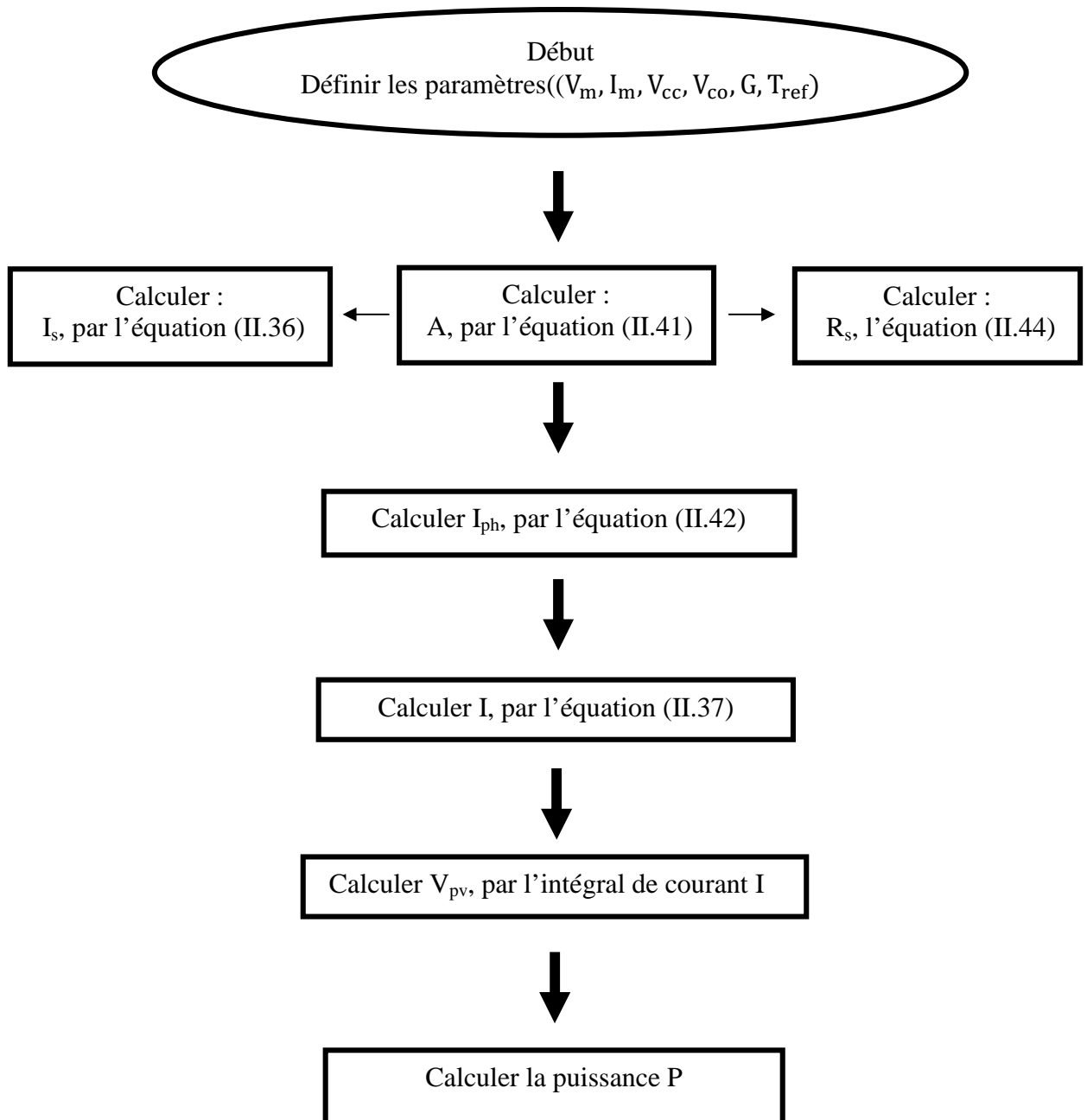


Fig. III.16 Organigramme de la Méthode de la pente au point ($V_{co}, 0$)

III.1.4.2 Bloc de simulation :

La figure ci-dessous représente le bloc de simulation qu'on a modélisé, avec Matlab-simulink. Pour calculer les quatre paramètres du module solaire.

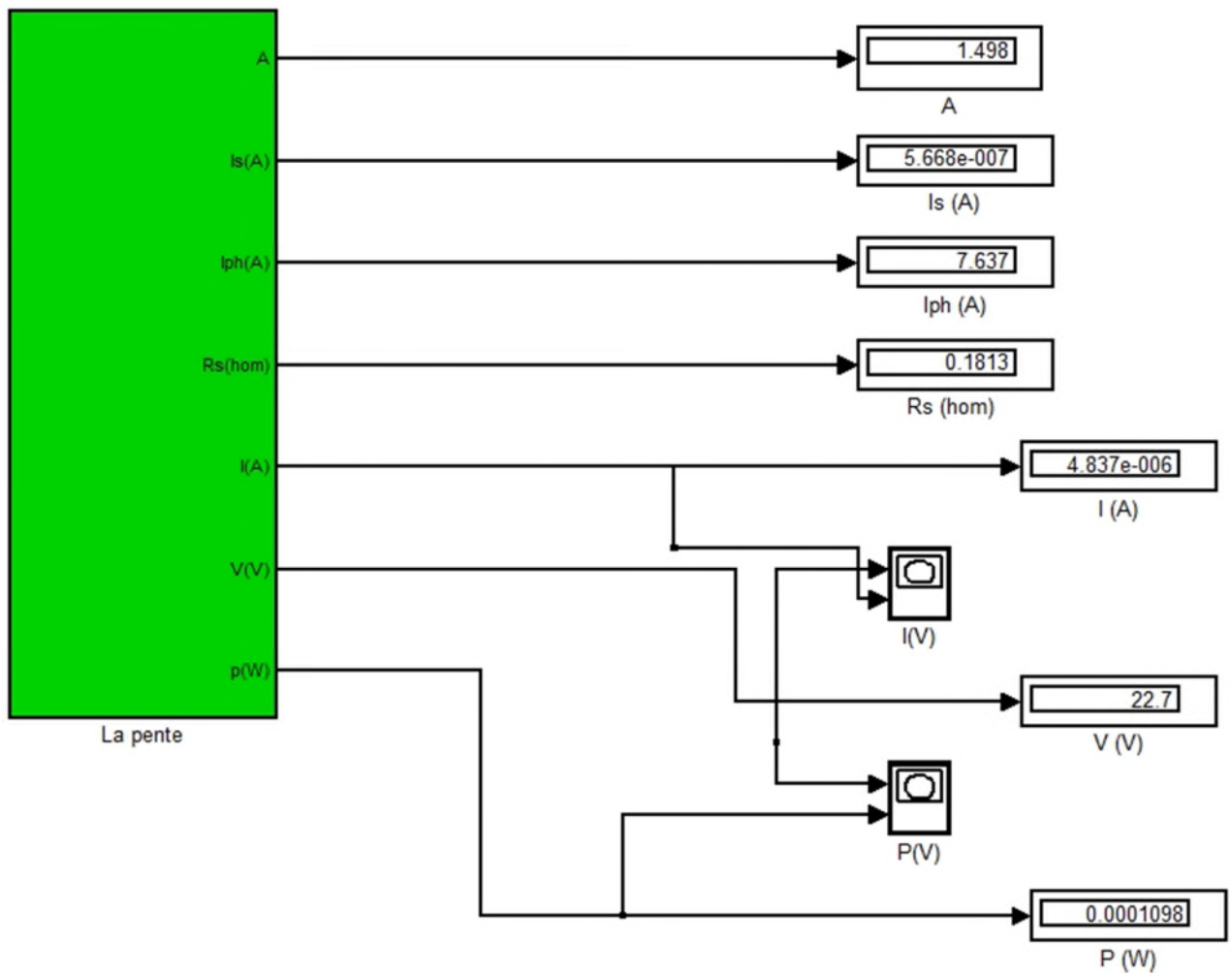


Fig.III.17 Bloc de la méthode de la pente au point ($V_{co}, 0$)

➤ **Le schéma interne :**

La figure suivante présente le schéma interne du bloc de simulation.

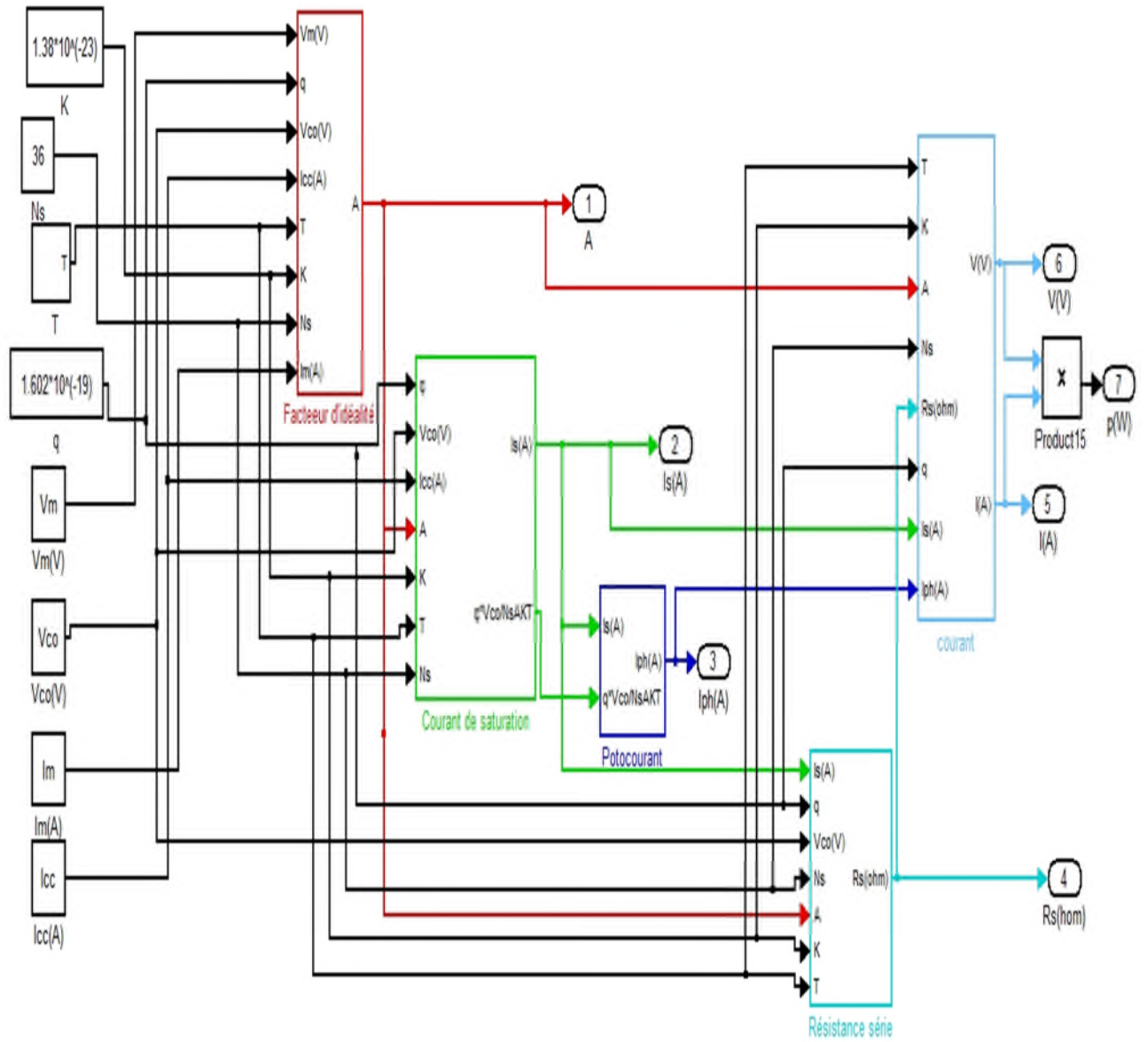


Fig.III.18 schéma interne de la méthode de la pente au point ($V_{co}, 0$)

III.1.4.3 Résultats :

Le tableau III.4 représente les résultats des cinq paramètres photovoltaïques qu'on a obtenus avec Matlab-simululik, pour le panneau de CONDOR S/N : CEM201408180141_52.

I_{ph} (A)	I_s (A)	R_s (Ω)	A
7.637	$5.668 \cdot 10^{-7}$	0.1813	1.498

TAB III.4 Résultats des paramètres d'extractions de la méthode de la pente au point (V_{co} , 0)

-La fig.III.19 et la fig.III.20 représente respectivement la caractéristique I(V) et la caractéristique P(v), générée avec les paramètres extraits pour un module solaire.

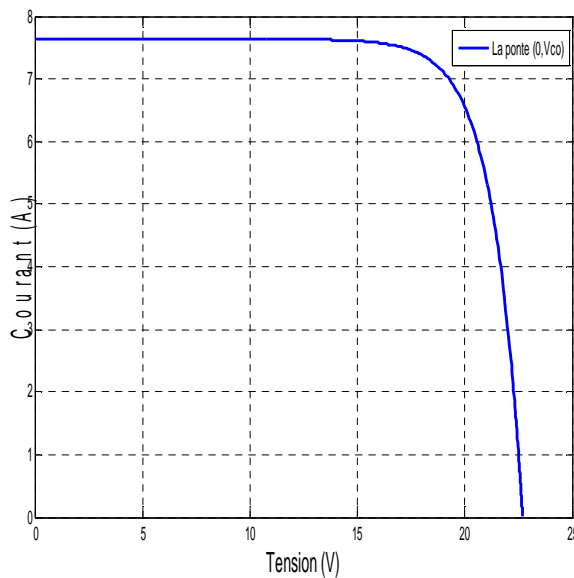


Fig III.19 : Caractéristique I(V)

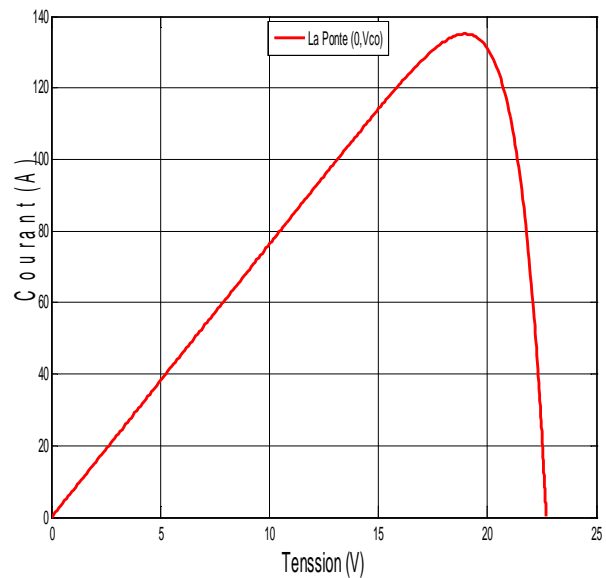


Fig III.20 : Caractéristique P(V)

III.2 Données du panneau

III.2.1 caractéristiques électriques et mécaniques de modèles photovoltaïques :

III.2.1.1 caractéristiques électriques

Le tableau III.5 représente la caractéristique électrique donnée par le constructeur

CONDOR S/N : CEM201408180141_52.

	Unité	module
Puissance maximale	W	150
Tension en circuit ouvert (V_{co})	V	22.733
Courant de court circuit (I_{sc})	A	7.637
Tension mpp (V_{mpp})	V	20.940
Courant mpp (I_{mpp})	A	7.178
Tension maximale de système VDC	V	1000
Charge maximale de fusibles (A)	A	10
Facteur de températures (cellule)		
Température nominale de fonctionnement	NOCT	45±2°C
Coefficient de température de puissance	%/°C	-0.41
Coefficient de température de courant	%/°C	+0.06
Coefficient de température de voltage	%/°C	-0.32

Tab III.5 : caractéristiques électriques

III.2.1.2 caractéristiques mécaniques

Le tableau III.6 représente la caractéristique mécanique donnée par le constructeur

CONDOR S/N : CEM201408180141_52.

Type de cellule	Cellule monocristalline avec anti-reflection
Nombre de cellule par module	36 cellules (4x9)
Dimension de la cellule	125x125 mm
Dimension de module	1200x553x35 mm
Poids de module	8 kg
Cadre	Alliage en aluminium anodisé
Type de verre	Verre trempé, 3.2 mm d'épaisseur
Boite de jonction et connecteur	IP65 ; 3 diode By-passe et câbles compatibles avec un connecteurMC4
Températures d'utilisation	-40°C A 85°C

Tab III.6 : caractéristiques mécaniques

III.2.2 La simulation expérimentale :

La figure ci-dessous représente les caractéristiques I(V), P(V) de la simulation expérimentale au laboratoire de l'usine CONDOR du panneau S/N : CEM201408180141_52.

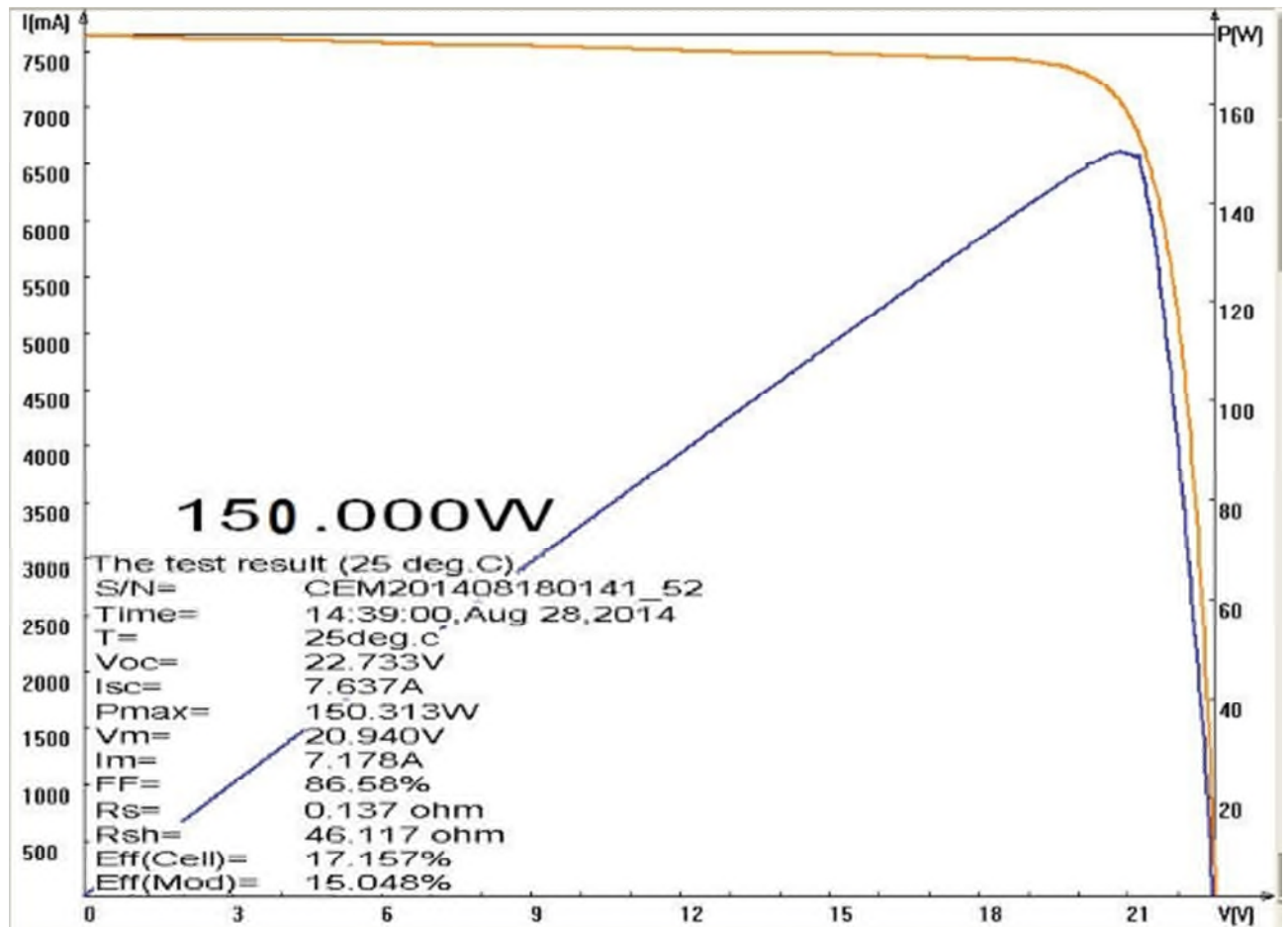


Fig III.21 : Caractéristique I(V) et P(V)

III.3 Interprétation des résultats :

Le tableau III.7 regroupe les différents paramètres extraits caractérisant le module solaire par les méthodes qu'on a utilisé.

	newton-raphson	analytique	explicite simplifiée	pente au point (V _{co} , 0)	Expérimentale
I _{ph} (A)	7.637	7.66	7.637	7.637	
I _s (A)	5.668 10 ⁻⁷	5.668 10 ⁻⁷	5.668 10 ⁻⁷	5.668 10 ⁻⁷	
A	1.498	1.498	1.498	1.498	
R _s (Ω)	0.1813	0.1813	0.2926	0.1813	0.137
R _{sh} (Ω)	48.46	50.12			46.117

Tab III.7 : Résultats des paramètres d'extractions

-La fig.III.22 et la fig.III.23 représente respectivement les caractéristiques I(V) et les caractéristiques P(v), regroupent les quatre allures.

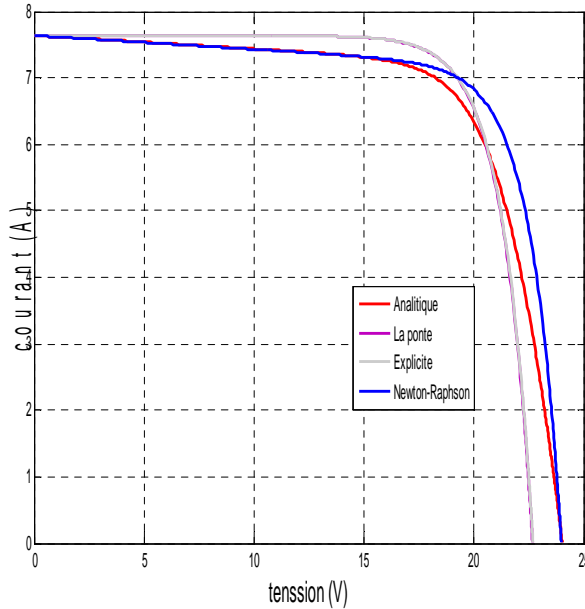


Fig III.22 : Caractéristique I(V)

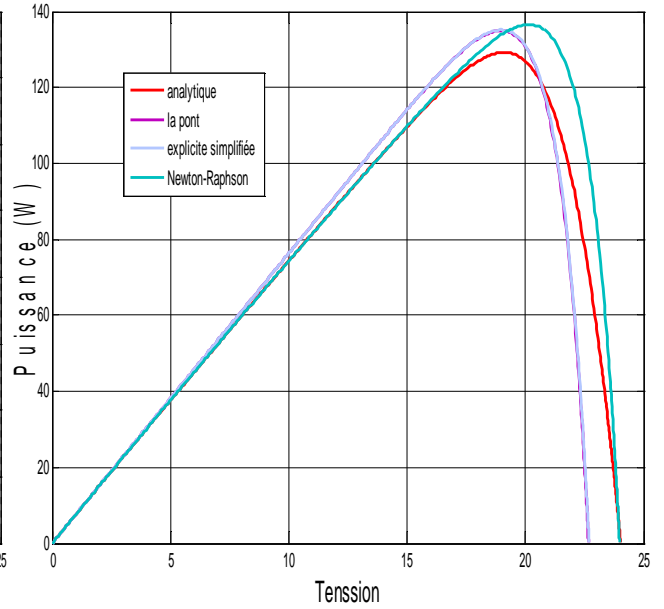


Fig III.23 : Caractéristique P(V)

Les équations de la section précédente pour les différentes méthodes de calculs des paramètres de la caractéristique courant-tension ont été simulées dans l'environnement Matlab pour le module solaire condor S/N= CEM201408180141852 (tableau III.5). Les résultats ont été comparés avec ceux fournis par le constructeur.

On remarque que malgré le courant de court-circuit et la tension en circuit ouvert sont presque les mêmes pour les différentes méthodes, le suivi à proximité du point de puissance maximal reste tributaire de la précision des paramètres déduits.

On constate que les méthodes à cinq paramètres ont plus de précision que les méthodes à quatre paramètres.

Conclusion

L'objectif de la modélisation des panneaux solaires est évidemment de décrire leurs comportements dans toutes les conditions d'utilisations. Quatre différentes méthodes de résolution ont été présentées afin de déterminer les différents paramètres spécifiques de la caractéristique courant-tension.

La méthode de la pente basée en partie de son algorithme sur le calcul géométrique, la méthode explicite simplifiée et la nouvelle méthode analytique est basée sur la résolution analytique et enfin la méthode de Newton-Raphson basée sur la résolution numérique.

En comparant leurs résultats avec ceux donnés par le constructeur pour le module condor S/N=CEM201408180141852, nous a permis de conclure que la méthode Newton-Raphson qui est plus proche aux données de constructeur est la plus précise.

Conclusion 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 prometteuse avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre.

Pour bien comprendre le comportement d'une cellule photovoltaïque, et être capable de simuler numériquement ces caractéristiques, à partir d'un modèle mathématique donné afin d'optimiser leur rendement, il faut d'abord identifier leurs paramètres. C'était l'objectif de ce travail.

A cause de la complexité des méthodes de mesure dynamique, plusieurs méthodes d'extraction paramétrique ont été proposées auparavant, parmi lesquelles celles qui se basent sur les méthodes itératives qui est le cas de l'approche adoptée dans notre travail. Nous avons étudiés Quatre méthodes pour la résolution des systèmes d'équations non linéaires à savoir la méthode de newton-raphson, la nouvelle méthode analytique, la méthode explicite simplifiée et la méthode de la pente, pour l'identification des paramètres de la cellule solaire.

Une comparaison des résultats obtenus par les méthodes développées et ceux du fabricant, a été présentée, Le travail réalisé dans ce mémoire a été basé sur les parties suivantes :

Dans un premier temps, nous avons essayé de faire une revue assez générale sur la technologie photovoltaïque, rappelant son principe de fonctionnement, ces différentes filières technologiques, et l'association des cellules dans un module photovoltaïque.

Dans la deuxième partie du mémoire, nous avons donné un aperçu sur les différents modèles électriques existant, et les méthodes étudiées pour l'identification des paramètres électriques de la cellule solaire, ensuite nous avons fait la modalisation de ces méthodes.

Dans le dernier chapitre, nous avons établis des programmes de calcul sous MATLAB qui nous a permis d'identifier les paramètres de la cellule photovoltaïque, et de tracer la caractéristique $I(V)$, et par la suite on a donné les valeur des paramètres de la cellule solaire qui sont le courant de phase I_{ph} , le courant de saturation I_s , la résistance série R_s , la résistance parallèle R_{sh} et le facteur d'idéalité A .

En fin on a comparé les résultats de simulation.

Références bibliographiques

- [1] A. Wagner, 'Peak-Power And Internal Series Resistance Measurement under Natural Ambient Conditions', EuroSun Conference, 2000 Copenhagen, June 19-22, 2000.
- [2] J.H. Smith and L.R. Reiter, 'An In-Depth Review of Photovoltaic System Performance Models', The American Society of Mechanical Engineers, 84-WA/Sol-12, 8 p., 1984.
- [3] Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°3 (2010) 379 – 388
- [4] A. Zerga, « Optimisation du rendement d'une cellule solaire à base de silicium monocristallin de type n⁺p », Mémoire de Magistère Tlemcen-1998.
- [5] Energie solaire photovoltaïque.doc / B. Flèche - D. Delagnes / juin 07. P. [1.18]
- [6] Thèses magistère 'Bengjllali zakaria, faculté des sciences et thermologie Univ-Bechar 2008-2009 p. [1-4], p. [35-37].
- [7] E. Michel, Arnaud Deves, « Energie photovoltaïque ». Comité scientifique et technique des industries climatique COSTIC, FNDAE n°12.Document technique (Réédition 2003).
- [8] J.Royer, T. Djiako, « LE POMPAGE PHOTOVOLTAÏQUE ». Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, université d'Ottawa/EIER/CREPA, 1998.
- [9] G.R. Walker, 'Evaluating MPPT Converter Topologies using a MATLAB PV Model', Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia, IEAust, Vol. 21, N°1, pp. 49 – 56, 2001.
- [10] Revu des énergies renouvelables vol 16 N°3 (2013)517-526
- [11] Thèses ingénieur MAOUCHA Abdelhak , département d'électronique Univ-batna 2011 p.[1-3]
- [12] T. Back, F. Hoffmeister, « Global optimization by means of evolutionary algorithms », Divnogorsk, EX-URSS, 1991, p.17.
- [13] Fundamental and Applied metrology. september 6-112009, Lisbon, Portugal. ISBN 978-963-88410-0-1, 2009 IMEKO
- [14] International Electrotechnical Commission, IEC 61215- 4:2005 – Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval, April 2005
-

- [15] J.A. Gow, C.D. Manning, "Development of a photovoltaic array model for use in power electronics simulation studies", *IEE Proc.Electr.Power Appl*, vol 146,.n°2, pp. 193-200, March. 1999.
- [16] W. Shockley, "The Theory of p-n Junctions in Semiconductors and p-n Junction Transistors.," *Bell System Technical Journal*, vol.28, pp. 435-489, 1949.
- [17] M. G. Villalva, J. R. Gazoli, and E. R. Filho, "Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 5, pp. 1198-1208, May 2009
- [18] K. L. Kennerud, "Analysis of Performance Degradation in," *Ieee Transactions On Aerospace And Electronic Systems*, no. 6, 1969.
- [19] D. Sera, R. Teodorescu, and P. Rodriguez, "PV panel model based on datasheet values," *Electrical Engineering*, no. 4, pp. 2392-2396, 2007
- [20] G. Walker, "Evaluating MPPT Converter Topologies Using a Matlab PV Model," *Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia*, vol. 21, no. 1, pp. 49-55, 2001.
- [21] W. Xiao, W. G. Dunford, and A. Capel, "A novel modeling method for photovoltaic cells," *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*, pp. 1950-1956, 2004.
- [22] W.L. De Soto, 'Improvement and Validation of a Model for Photovoltaic Array Performance', MS Thesis, Solar Energy Laboratory University of Wisconsin-Madison, 2004.
- [23] J.M. Enrique, E. Duran, M. Sidrach de Cardona, J.M. Andujar, M.A. Bohorquez and J. Carratero, 'A New Approach to Obtain I-V and P-V Curves of Photovoltaic Modules by Using DC/DC Converters', *Rec. IEEE Photovoltaic Specialist Conference*, pp. 1769 - 1722, 2005.
- [24] D. Chan and J. Phang, 'Analytical Methods for the Extraction of Solar Cell Single- and Double-Diode Model Parameters from I-V Characteristics', *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. 34, N°2, pp. 286 - 293, 1987.
- [25] D. Sera, R. Teodorescu and P. Rodriguez, 'PV Panel Model Based on Datasheet Values' *ISIE-07, IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 2392 - 2396, 2007.
- [26] J.A. Gow and C.D. Manning, 'Development of a Photovoltaic Array Model for Use in Power Electronics Simulation Studies', *IEE Proceedings on Electric Power Applications*, Vol. 146, N°2, pp. 193 - 200, 1999.
-

- [27] G. Walker, "Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model," *Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia, IEAust*, vol.21, No. 1, 2001, pp.49- 56.
-