
Méthodes d'identification des paramètres de la caractéristique I-V

3.1. Introduction

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

Ces paramètres sont déterminés difficilement par les méthodes de mesure dynamique, et surtout pour la production en série des cellules solaires. Par contre, ils existent des méthodes qui n'utilisent que les données fournis par le constructeur ou uniquement la caractéristique I-V de la cellule, tout en exploitant un des modèles existant dans la littérature.

Quelques méthodes proposées utilisant des mesures prises aux différents niveaux lumineux, tandis que d'autres emploient les conditions de lumière et d'obscurité.

Deux modèles sont utilisés fréquemment dans ce domaine d'étude: le modèle à une diode, et le modèle à deux exponentielles [17].

- Les paramètres du modèle à simple exponentielle (une seule diode) sont: le courant de saturation, la résistance série, le facteur d'idéalité, la résistance shunt, et le photo-courant.

- Les paramètres du modèle à double exponentielle (deux diode) à extraire sont: les deux courants de saturation, la résistance série, la résistance shunt, et le photo-courant.

Plusieurs méthodes ont été proposées pour l'extraction de ces paramètres:

- Les méthodes analytiques de phang
- La méthode numérique
 - La méthode numérique utilisant les techniques I-A (Intelligence artificiel)
 - La méthode numérique utilisant les méthodes classiques de fitting)

Notre approche d'identification est basée sur la méthode des cinq points. Cette dernière est conçue pour l'identification, seulement, les cinq paramètres, où les deux facteurs d'idéalité sont supposés des constants comme: $m_1=1$ et $m_2=2$. Afin de calculer les valeurs exactes de ces deux paramètres nous allons développer un algorithme qui permet de tenir en compte ces deux facteurs d'idéalité [18].

3.2. Méthodes analytique d'extraction des paramètres

Extraction des paramètres des modèles de la caractéristique I-V directe Lorsqu'on dispose d'une caractéristique I-V mesurée pour un éclairement et une température donnés, il est facile de repérer les paramètres du modèle explicite (I_{sc} , V_{oc} , I_{mp} et V_{mp}). Mais pour les deux modèles implicites (modèle à une diode et modèle à deux diodes) des technologies d'extraction sont nécessaires.

3.2.1. Méthode de 3 points

3.2.1.1. Modèle à une diode (modèle de phang)

La méthode se base sur le principe suivant :

Les paramètres du modèle à savoir I_{ph} , I_0 , m , R_s , R_{sh} peuvent être calculés à partir des mêmes points sur la figure (3.1) mais d'une manière différente en utilisant la méthode de phang, ou on considère également, les pentes de la courbe I-V aux deux extrémités [19]:

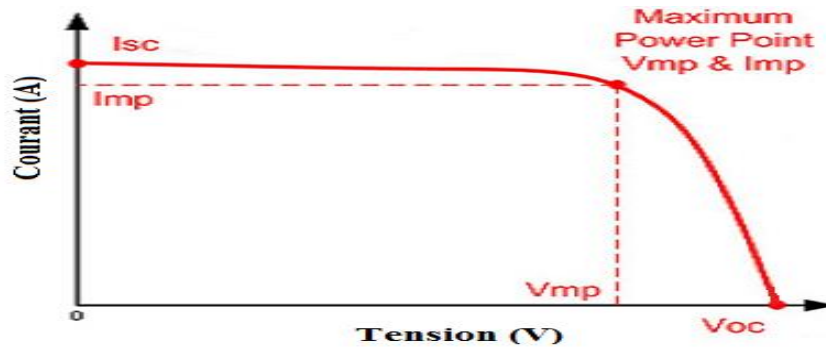


Figure 3.1. Caractéristiques I-V pour le modèle de trois points.

$$I = I_{ph} - I_0 \left(\exp \left(\frac{V + IR_s}{m \cdot V_t} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (3.1)$$

$$R_{s0} = \left[\frac{dV}{dI} \right]_{V=V_{oc}} \quad (3.2)$$

$$R_{sh0} = \left[\frac{dV}{dI} \right]_{I=I_{sc}} \quad (3.3)$$

- A partir de (eq.3.1), on peut tirer l'expression de I_{ph} :

$$I_{ph} = I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{mV_t}\right) - 1 \right] + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \quad (3.4)$$

- En faisant la soustraction de l'équation 3.23 de l'équation 3.22, on obtiendra, après arrangement l'équation suivante :

$$I_0 \left(\exp\left(\frac{V_{oc}}{mV_t}\right) - \exp\left(\frac{I_{sc}R_s}{mV_t}\right) \right) - I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} = 0 \quad (3.5)$$

- En dérivant l'équation 3.1 par rapport à la tension au point $V=V_{oc}$, puis au point $I=I_{sc}$, on aura, après arrangement, les deux équations suivantes :

$$(R_{s0} - R_s) \left(\frac{I_0}{mV_t} \exp\left(\frac{V_{oc}}{mV_t}\right) + \frac{1}{R_{sh}} \right) - 1 = 0 \quad (3.6)$$

$$\frac{1}{R_{sh}} - \frac{1}{R_{sh0} - R_s} + \frac{I_0}{mV_t} \exp\left(\frac{R_s I_{sc}}{mV_t}\right) = 0 \quad (3.7)$$

- En remplaçant l'expression d' I_{ph} dans l'équation 3.1 écrite pour le point de puissance maximale, on obtiendra :

$$I_0 \exp\left(\frac{V_{oc}}{mV_t}\right) + \frac{V_{oc} - V_{mp}}{R_{sh}} - I_m \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) - I_0 \exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{mV_t}\right) = 0 \quad (3.8)$$

Pour un module PV typique, certaines approximations peuvent être faites. On peut notamment considérer que : $\frac{R_s}{R_{sh}} \ll 1$, $\frac{1}{R_{sh}} \approx 0$ et $R_{sh} \approx R_{sh0}$

Les équations 3.5 à 2.8 deviennent alors :

$$I_0 \exp\left(\frac{V_{oc}}{mV_t}\right) - I_{sc} + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} = 0 \quad (3.9)$$

$$(R_{s0} - R_s) \frac{I_0}{V_t} \exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right) - 1 = 0 \quad (3.10)$$

Sachant que $R_{sh} = R_{sh0}$

$$I_0 \exp\left(\frac{V_{oc}}{mV_t}\right) + \frac{V_{oc} - V_{mp}}{R_{sh}} - I_{mp} - I_0 \exp\left(\frac{V_{mp} + R_s I_{mp}}{mV_t}\right) = 0 \quad (3.11)$$

A partir de ces équations, une expression analytique de m en fonction des paramètres électrique mesurés peut être déduite. Elle est donnée par :

$$m = \frac{V_{mp} + R_{s0} I_{mp} - V_{oc}}{V_t \left\{ \ln \left(I_{sc} - \frac{V_{mp}}{R_{sh0}} - I_{mp} \right) - \ln \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right) + \left(\frac{I_{mp}}{I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh0}}} \right) \right\}} \quad (3.12)$$

$$I_0 = \left(I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \right) \exp \left(-\frac{V_{oc}}{mV_t} \right) \quad (3.13)$$

$$R_s = R_{s0} - \frac{mV_t}{I_0} \exp \left(-\frac{V_{oc}}{mV_t} \right) \quad (3.14)$$

$$I_{ph} = I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) + I_0 \left(\exp \frac{I_{sc} R_s}{mV_t} - 1 \right) \quad (3.15)$$

Sachent que $R_{sh} \approx R_{sh0}$

Ainsi donc, on est arrivé à avoir des expressions analytiques simples pour les cinq paramètres Du modèle à une diode.

L'intérêt réside dans le fait que ces expression sont faciles à implémenter dans un programme permettent le calcul des paramètres sans introduit les valeurs initiales de ces derniers, surtout lorsqu'il s'agit d'un outil qui fait à la fois l'acquisition des données (I-V) et l'extraction des paramètres d'un module ou cellule photovoltaïque.

D'un autre côté, cette méthode est une bonne façon de déterminer les valeurs initiales du paramètre pour utiliser la méthode itérative ou une méthode d'ajustement de courbe [19].

3.2.1.2. Modèle à deux diodes

Les paramètres à déterminer sont $I_{ph}, I_{01}, I_{02}, R_s, R_{sh}$ avec $m_1=1$ et $m_2=2$

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(\exp \left(\frac{V}{m_1 \cdot V_t} \right) - 1 \right) - I_{02} \left(\exp \left(\frac{V}{m_2 \cdot V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + I \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (3.16)$$

Détermination des courants I_{01} et I_{02} :

En supposant que les deux courants des diodes sont de même ordre de grandeurs à la tension de circuit-ouvert (à $V=V_{oc}$) et en considérant que $R_{sh} \gg R_s$.

On peut estimes les courant I_{01} et I_{02} par les deux relations suivantes:

$$I_{01} = \frac{1}{2} \frac{I_{ph}}{\left[\exp \left(\frac{V_{oc}}{V_t} \right) - 1 \right]} \quad (3.17)$$

$$I_{02} = \frac{1}{2} \frac{I_{ph}}{\left[\exp \left(\frac{V_{oc}}{2V_t} \right) - 1 \right]} \quad (3.19)$$

Détermination du courant I_{ph} :

A la tension $V=V_{oc}$ l'équation et en considérant que $R_{sh} \gg R_s$

$$I_{ph} \approx I_{01} \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{V_t}\right) - 1 \right] + I_{02} \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{2V_t}\right) - 1 \right] \quad (3.20)$$

Détermination de la résistance série R_s :

En exploitant la relation du module à une diode, mais en ce cas on calcule la valeur de R_s (R_{s1} pour $m=1$, R_{s2} pour $m=2$).

Ainsi la résistance série sera donnée par la relation suivante :

$$R_s = \frac{R_{s0} - \frac{V_t}{I_{01}} \exp\left(-\frac{V_{oc}}{V_t}\right)}{2} + \frac{R_{s0} - \frac{V_t}{I_{02}} \exp\left(-\frac{V_0}{2V_t}\right)}{2} \quad (3.21)$$

$$R_s = R_{sh0}$$

3.2.2. Méthode de cinq points

Ces cinq points doivent être : le point de court-circuit ($0, I_{sc}$), le point de circuit ouvert ($V_{oc}, 0$), le point de puissance maximale (V_{mp}, I_{mp}) et deux autres points (V_x, I_x) et (V_{xx}, I_{xx}) comme le montre la figure 2.2. V_x est aux environs de $\frac{1}{2} V_{oc}$ et V_{xx} aux environs de $\frac{1}{2} (V_{oc} + V_{mp})$. Le choix de ces points a été fait selon les définitions suivantes :

- P1: ($0, I_{sc}$) : courant de court-circuit.
- P2: (V_x, I_x) = ($V_{oc}/2, I(V_{oc}/2)$).
- P3: (V_{mp}, I_{mp}) : point de la puissance maximale MPP.
- P4: (V_{xx}, I_{xx}) = ($(V_{oc} + V_{mp})/2, I((V_{oc} + V_{mp})/2)$).
- P5: ($V_{oc}, 0$) = la tension de circuit ouvert et le courant égale à zéro.

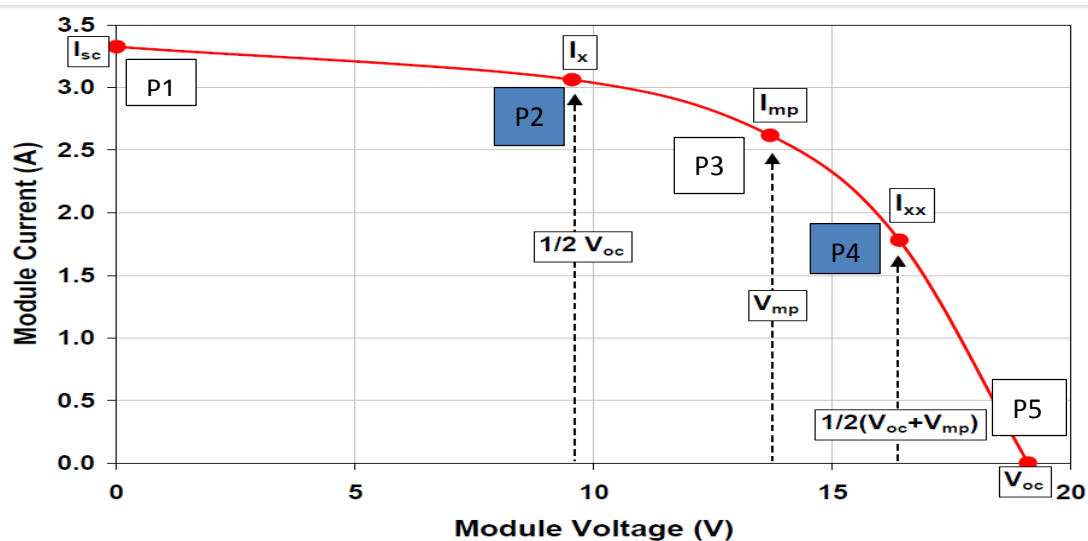


Figure 2.2. Les cinq points sur la courbe I-V utilisés pour calculer les paramètres du module PV par la méthode itérative à cinq points.

3.2.2.1. Modèle à une diode

Le principe est simple. En appliquant l'équation 3.1 en cinq points bien choisis sur la courbe I-V mesurée pour un éclairement et une température donnés, on obtiendra un système de cinq équations non linéaire à cinq inconnues qui représentent les cinq paramètres qu'on peut déterminer par la résolution numérique du système.

Donc, en réécrivant l'équation 3.1 sous la forme $F(I,V)=0$, aux cinq points considérés, les cinq équations du système sont suivantes :

$$I_{sc} - I_{ph} + I_0 \left[\exp\left(\frac{I_{sc}R_s}{mV_t}\right) - 1 \right] + \frac{I_{sc}R_s}{R_{sh}} = 0 \quad (3.22)$$

$$-I_{ph} + I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{oc}}{mV_t}\right) - 1 \right] + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} = 0 \quad (3.23)$$

$$I_{mp} - I_{ph} + I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{mV_t}\right) - 1 \right] + \frac{V_{mp} + I_{mp}R_s}{R_{sh}} = 0 \quad (3.24)$$

$$I_x - I_{ph} + I_0 \left[\exp\left(\frac{V_x + I_xR_s}{mV_t}\right) - 1 \right] + \frac{V_x + I_xR_s}{R_{sh}} = 0 \quad (3.25)$$

$$I_{xx} - I_{ph} + I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{xx} + I_{xx}R_s}{mV_t}\right) - 1 \right] + \frac{V_{xx} + I_{xx}R_s}{R_{sh}} = 0 \quad (3.26)$$

Les équations allant de 3.22 à 3.26 constituent donc un système non linéaire qu'on peut résoudre avec des méthodes itératives connues telle que celle de Newton-Raphson ou la méthode des approximations successives.

L'inconvénient majeur de cette technique est qu'elle exige l'introduction de valeurs initiales ou de définir des intervalles qui conduit à une convergence rapide et un mauvais choix impliquera une convergence lente ou la divergence.

Donc, le choix de ces valeurs initiales exige une très bonne maîtrise, d'où le besoin d'une méthode analytique ne nécessitant pas de valeurs initiales [19].

3.2.2.2. Modèle à deux diodes

Pour déterminer les paramètres de ce modèle décrit par l'équation 3.23, nous proposons d'utiliser la même méthode itérative précédente, mais une procédure analytique permettant de bien approximer les valeurs des paramètres ($I_{ph}, I_{01}, I_{02}, R_s$ et R_{sh}) est nécessaire afin que le système d'équation converge. On a donc à résoudre le système constitué des équations suivantes :

$$I_{sc} - I_{ph} + I_{01} \left[\exp \left(\frac{I_{sc} R_s}{m_1 V_t} \right) - 1 \right] + I_{02} \left[\exp \left(\frac{I_{sc} R_s}{m_2 V_t} \right) - 1 \right] + \frac{I_{sc} R_s}{R_{sh}} = 0 \quad (3.27)$$

$$-I_{ph} + I_{01} \left[\exp \left(\frac{V_{oc}}{m_1 V_t} \right) - 1 \right] + I_{02} \left[\exp \left(\frac{V_{oc}}{m_2 V_t} \right) - 1 \right] + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} = 0 \quad (3.28)$$

$$I_{mp} - I_{ph} + I_{01} \left[\exp \left(\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{m_1 V_t} \right) - 1 \right] + I_{02} \left[\exp \left(\frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{m_2 V_t} \right) - 1 \right] + \frac{V_{mp} + I_{mp} R_s}{R_{sh}} = 0 \quad (3.29)$$

$$I_x - I_{ph} + I_{01} \left[\exp \left(\frac{V_x + I_x R_s}{m_1 V_t} \right) - 1 \right] + I_{02} \left[\exp \left(\frac{V_x + I_x R_s}{m_2 V_t} \right) - 1 \right] + \frac{V_x + I_x R_s}{R_{sh}} = 0 \quad (3.30)$$

$$I_{xx} - I_{ph} + I_{01} \left[\exp \left(\frac{V_{xx} + I_{xx} R_s}{m_1 V_t} \right) - 1 \right] + I_{02} \left[\exp \left(\frac{V_{xx} + I_{xx} R_s}{m_2 V_t} \right) - 1 \right] + \frac{V_{xx} + I_{xx} R_s}{R_{sh}} = 0 \quad (3.31)$$

- Le photo-courant I_{ph} n'étant que légèrement différent du courant de court-circuit I_{sc} , ce dernier est pris comme valeurs initiale.
- La valeur initiale de la résistance shunt est obtenue en calculant la pente de la courbe I-V au point $I = I_{sc}$ selon la relation 3.2.
- En supposant que les deux courants des diodes sont du même ordre de grandeur à $V=V_{oc}$ et en considérant que $R_{sh} \gg R_s$, on peut estimer les valeurs initiales de I_{01} Et I_{02} en procédant comme suit:

A, $V=V_{oc}$, l'équation 3.16 devient :

$$I_{ph} \approx I_{01} \left[\exp \left(\frac{V_{oc}}{V_t} \right) - 1 \right] + I_{02} \left[\exp \left(\frac{V_{oc}}{2V_t} \right) - 1 \right] \quad (3.32)$$

En considérant également que les contributions des diodes sont égales, on peut estimer les valeurs initiales de I_{01} et I_{02} par les deux relations suivantes :

$$I_{01} = \frac{1}{2} \frac{I_{ph}}{\left[\exp \left(\frac{V_{oc}}{V_t} \right) - 1 \right]} \quad (3.33)$$

$$I_{02} = \frac{1}{2} \frac{I_{ph}}{\left[\exp \left(\frac{V_{oc}}{2V_t} \right) - 1 \right]} \quad (3.34)$$

- Pour estimer la valeur initiale de R_s , on se sert de la relation (3.14) utilisée pour le modèle à une diode. mais ici, on calcul deux valeur de R_s , la première pour $m=1$ et la seconde pour $m=2$. ainsi, la résistance série est à une valeur intermédiaire.

De la même manière, on peut définir une deuxième méthode pour estimer les valeurs initiale de I_{01} et I_{02} en utilisant la relation 3.13 en prenant $m=1$ pour I_{01} et $m=2$ pour I_{02} .

Il existe d'autres méthodes pour calculer les valeurs initiales. Elles aboutissent, en générale, à des expressions beaucoup plus complexes. Mais cela n'est pas nécessaire dans notre cas car, l'objectif est de délimiter des intervalles assez petit autours des solutions afin que le calcul itératif converge le plus rapidement possible [19].

3.3. Méthode numériques d'extraction des paramètres du modèle à une diode

A partir d'une courbe I-V obtenue expérimentalement pour un éclairage et une température donnés, on à déterminer les valeurs des cinq paramètres suivants: I_{ph}, I_0, m, R_s et R_{sh}

En prenant certains points bien définis sur la courbe I-V, on peut utiliser les deux méthodes suivantes.

3.3.1. Méthode de Newton Raphson

Il est possible de déterminer ces caractéristiques par des méthodes numériques itératives. (La méthode de dichotomie, la méthode de Lagrange, la méthode de point fixe et la méthode de Newton Raphson).

La méthode de Newton Raphson est choisie pour la convergence rapide de la réponse [14.20].

- La méthode de Newton Raphson est l'une des méthodes les plus utilisées pour la résolution des équations non linéaires. L'algorithme de cette méthode est basé sur l'utilisation du développement de Taylor. Soit une équation à résoudre de la forme :

$$f(x) = 0 \quad (3.35)$$

A partir d'une valeur initiale x_0 de la solution, on cherche une correction δx telle que

$$0 = f(x_0 + \delta x) \quad (3.36)$$

En faisant un développement de Taylor autour de $x = x_0$, on trouve :

$$0 = f(x_0) + f'(x_0) \cdot \delta x + \left(\frac{f''(x_0) \cdot \delta x^2}{2!} \right) + \left(\frac{f'''(x_0) \cdot \delta x^3}{3!} \right) + \dots \quad (3.37)$$

Il suffit maintenant de négliger les termes d'ordre supérieur ou égal 2 en i pour obtenir :

$$f(x_0) + f'(x_0) \cdot \delta x \approx 0 \quad (3.38)$$

On peut alors isoler la correction recherchée :

$$\delta x = -\frac{f(x)}{f'(x_0)} \quad (3.39)$$

La correction δx est en principe la quantité que l'on doit ajouter pour annuler la fonction $f(x)$ puisque nous avons négligé les termes d'ordre supérieur ou égal à 2 dans le développement de Taylor, cette correction n'est pas parfaite et on pose :

$$x_1 = x_0 + \delta x \quad (3.40)$$

Donc :

$$x_{i+1} = x_i - \frac{f(x)}{f'(x_0)} \quad (3.41)$$

Avec :

$f'(x)$: est la dérivée de la fonction

$f(x) = 0$: est une valeur actuelle et x_{i+1} est une prochaine valeur.

$$f(I) = I_{sc} + V - I_{01} \left(\exp \left(\frac{V + IR_s}{m_1 \cdot Vt} \right) - 1 \right) - I_{02} \left(\exp \left(\frac{V + IR_s}{m_2 \cdot Vt} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (3.42)$$

La substitution de cette équation dans l'équation 3. donne l'équation suivante, et le courant de sortie est calculé itérativement.

$$\begin{aligned} I_{(i+1)} \\ = I_{(i)} \\ - \frac{I_{sc} + I_{(i)} - I_{01} \left(\exp \left(\frac{V + I_{(i)} R_s}{m_1 \cdot Vt} \right) - 1 \right) - I_{02} \left(\exp \left(\frac{V + I_{(i)} R_s}{m_2 \cdot Vt} \right) - 1 \right) - \left(\frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right)}{-1 - I_{01} \left(\frac{R_s}{Vt} \right) \cdot \exp \left(\frac{V + I_{(i)} R_s}{m_1 \cdot Vt} \right) - I_{02} \cdot \left(\frac{R_s}{Vt} \right) \exp \left(\frac{V + I_{(i)} R_s}{m_2 \cdot Vt} \right) - \left(\frac{R_s}{R_{sh}} \right)} \end{aligned} \quad (3.43)$$

3.3.2. Méthode de région de confiance (trust region)

L'idée de la méthode de la région de confiance est d'approcher $f(x_k)$ par une fonction plus simple m_k dans une région R_k de confiance

$$R_k = \{x_k + p; \|p\| \leq \Delta\} \quad (3.44)$$

Pour un Δ fixe. Cette région de confiance doit être suffisamment petite pour que :

$$R_k(x_k + p) \cong f(x_k + p) \quad (3.45)$$

Au lieu de résoudre l'équation :

$$f(x_k + 1) = \min_{\|p\| \leq \Delta} f(x_k + p) \quad (3.46)$$

On ressource $(x_k + 1) = \min m_k (x_k + p)$ pour trouver $x_k + 1$. Si la différence entre $f(x_k + 1)$ et $m_k (x_k + 1)$ est trop grande, on diminue le Δ (et donc la région de confiance) et on ressource à nouveau. Un avantage de cette méthode est que toutes les directions sont prises en compte. Par contre, nous devons faire attention à ne pas trop nous éloigner de x_k , car la fonction m_k n'approche que sur une région proche de x_k .

La taille de la région de confiance est essentielle pour déterminer l'efficacité de chaque pas. En effet, une région de confiance "trop petite" peut être à l'origine de calculs inutiles, et peut, de plus, faire converger la solution vers un point qui ne correspond pas au minimum de la fonction objectif (f). Si, par contre, la région de confiance est "trop grande", le point qui minimise la fonction modèle m peut être assez éloigné du point qui minimise la fonction objectif, dans ce cas, on doit réduire la taille de la région [21].

En pratique, la taille de la région de confiance est déterminée en se basant sur la performance de l'algorithme au cours dernières itérations. Si le modèle est bon, c'est-à-dire si la fonction modèle est capable de décrire correctement le comportement de la fonction objectif, la taille de la région de confiance peut être augmentée afin de déterminer des pas plus performants. Dans le cas contraire, on réduit la taille de la région de confiance. Les étapes suivies pour résoudre le système d'équation (utilisant la méthode région de confiance).

Afin de tester la précision des courbes obtenues, nous avons calculé les écarts relatifs moyens algébriques (MBE), absolu (MAE), et quadratique (RMSE) qui sont données par les expressions ci-dessous :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum |e_1|^2}{N}} \quad (3.47)$$

$$MBE = \frac{\sum e_1}{N} \quad (3.48)$$

$$MAE = \frac{\sum |e_1|}{N} \quad (3.49)$$

Tel que:

$e_1 = (I_i - I_{i.cal}) * \left(\frac{100}{I_i}\right)$ représente le pourcentage d'erreur.

I_i est le courant mesuré (en A).

$I_{i.cal}$ est le courant calculé (en A).

N est la taille de vecteur mesuré V_i ou I_i

3.4. Caractéristiques électriques du module PV utilisé

Tableau 3.1: Caractéristiques électriques sous conditions de test standard STC donnée par le constructeur du module photovoltaïque utilisé.

Grandeurs	Valeur
Eclairement standard, G	1000 W/m ²
Température cellule, T_c	25°C
Puissance crête maximale, P_{mp}	180 W
Tension au MPP, V_{mp}	28,6 V
Courant au MPP, I_{mp}	6.29 A
Tension de circuit-ouvert, V_{oc}	36 V
Courant de court-circuit, I_{sc}	6,98

Tableau3.1. Caractéristiques électriques du module photovoltaïque

3.5. Méthode de validation

Pour les deux modèles (à une diode ou à deux diodes), nous avons identifié leurs paramètres avec deux méthodes (méthode des cinq points et méthode des trois points) ce qui donne quatre programmes de simulation développés sous Matlab/Simulink.

Les schéma bloc des quatre programmes sont présentés sur les tableaux (3.2),(3.3),(3.4),(3.5).

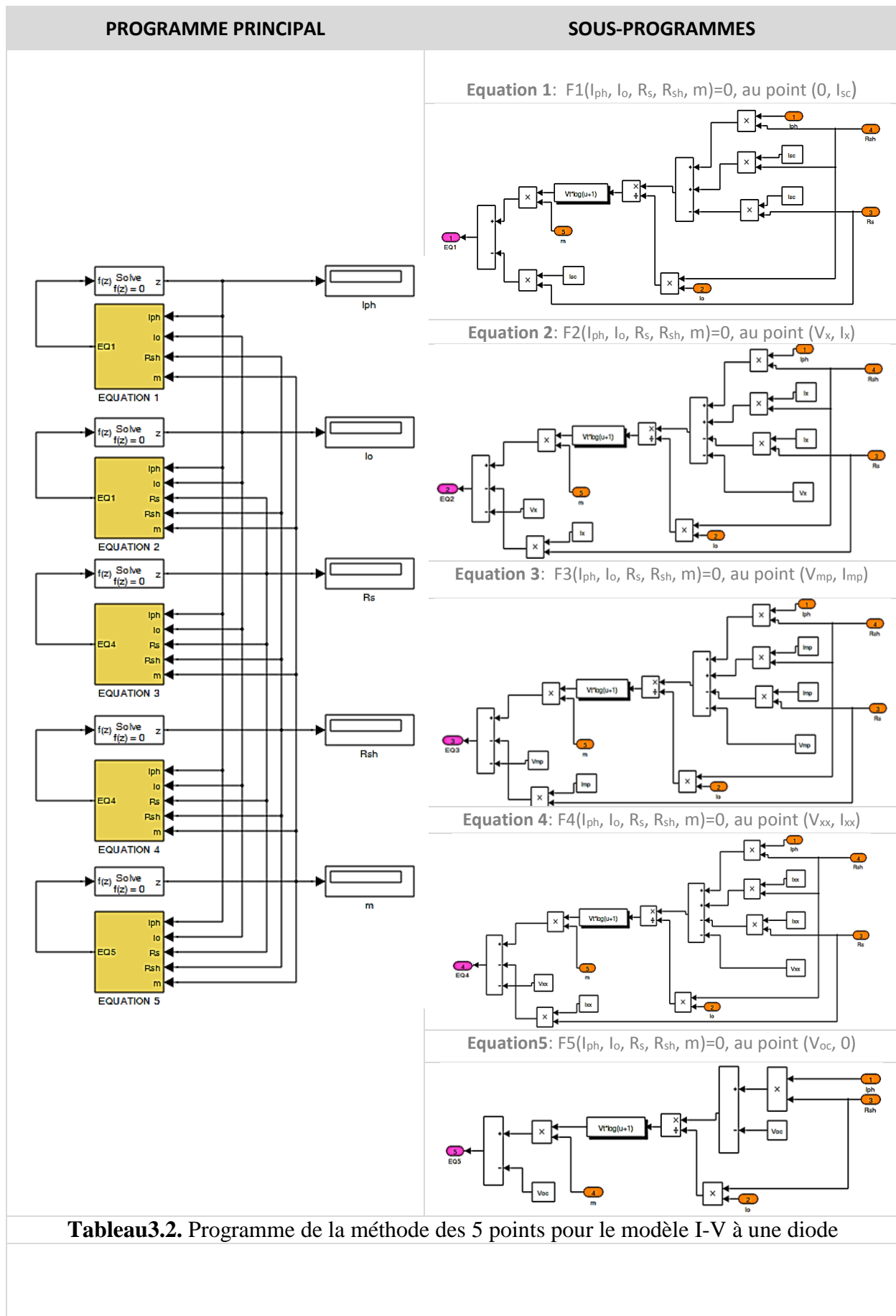


Tableau3.2. Programme de la méthode des 5 points pour le modèle I-V à une diode

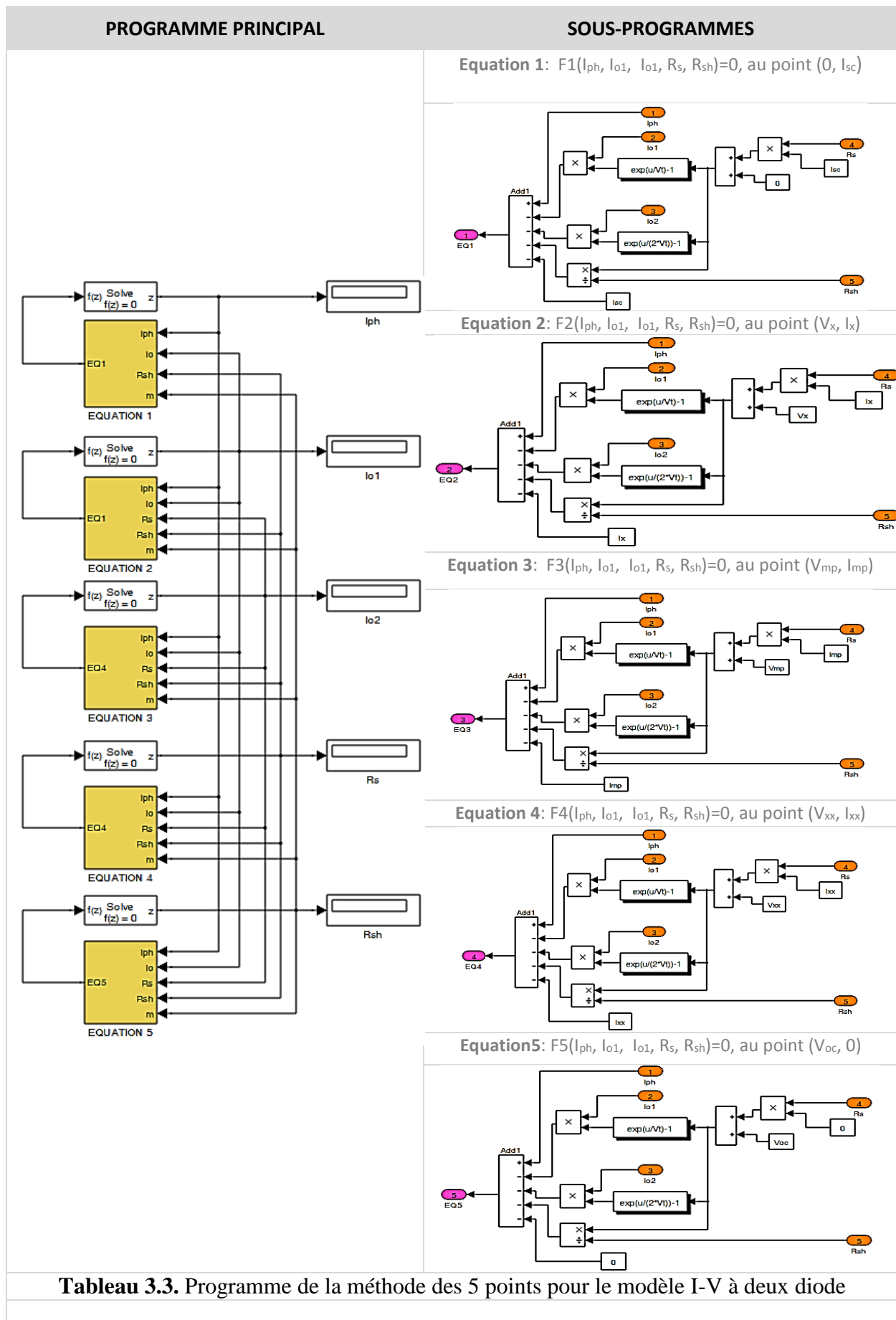


Tableau 3.3. Programme de la méthode des 5 points pour le modèle I-V à deux diode

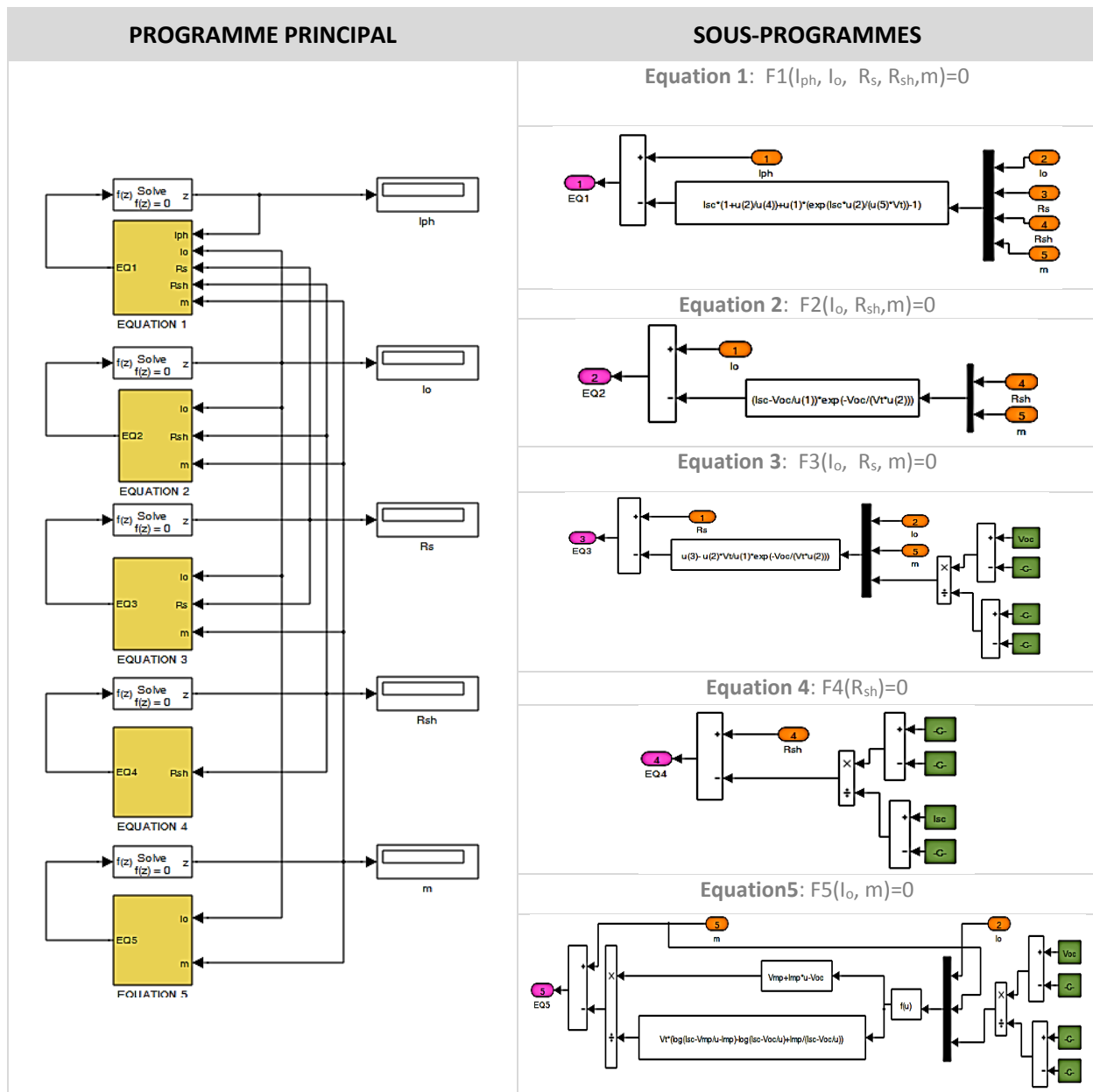


Tableau 3.4. Programme de la méthode de 3 points (Modèle de Phang) pour le modèle I-V à une diode

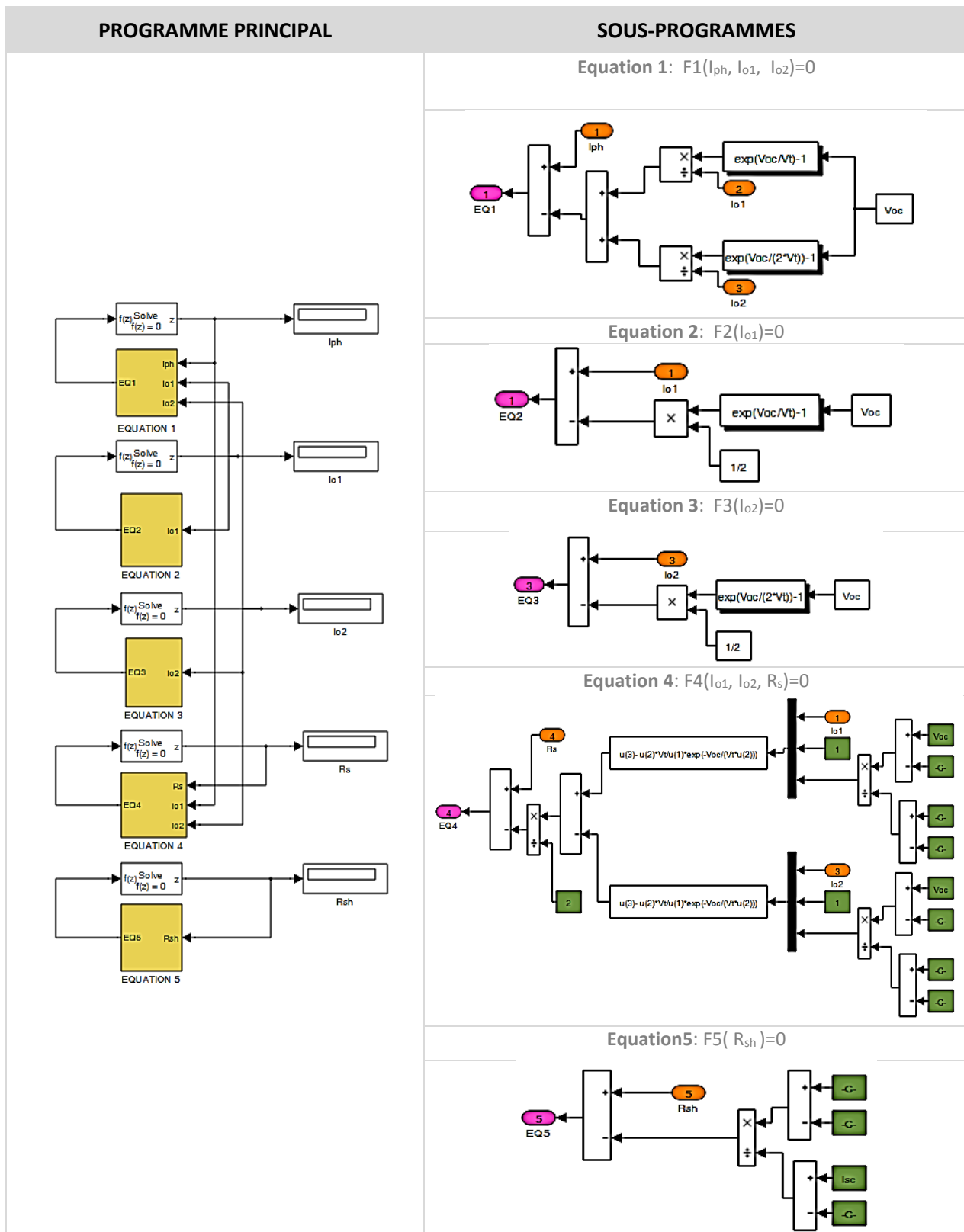


Tableau 3.5. Programme de la méthode de 3 points (Modèle de Phang) pour le modèle I-V à deux diodes

3.6. Résultats et discussions

Dans ce qui suit, nous présenterons les résultats obtenus pour chaque méthode d'identification. Il s'agit notamment des figures qui illustrent les courbes théoriques obtenues par la simulation et les courbes expérimentales correspondantes ainsi que des tableaux regroupant les valeurs des paramètres des deux modèles calculées pour chaque modèle.

Quant à la comparaison mesuré-simulée, nous avons procédé au calcul de l'erreur relative, dont l'expression est la suivante :

$$\varepsilon_r(\%) = \frac{\text{valeur mesuré} - \text{valeur simulée}}{\text{valeur mesuré}} \times 100 \quad (3.50)$$

3.6.1. Modèle à une diode

Pour ce modèle (à une diode), on a près quatre mesures (expérimentales) sous différentes conditions de rayonnement G et température T .

- Résultat de **Mesure 1** **1^{er} Cas:** **$G=463 \text{ W/m}^2$** et **$T_c=35^\circ\text{C}$**

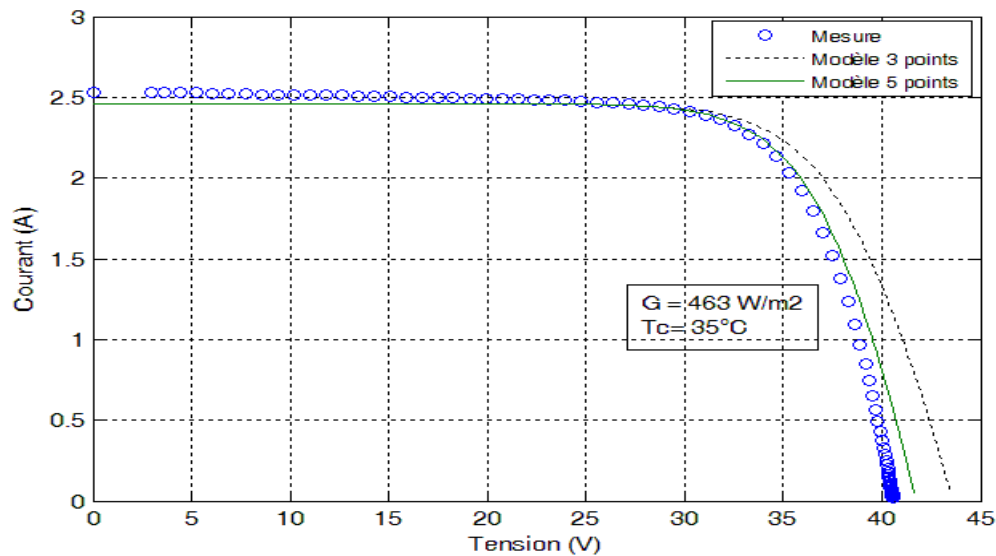


Figure 3.3. Caractéristiques I-V du 1^{er} cas pour le modèle à une diode.

On remarque sur la figure (3.5) que la courbe de méthode des cinq points est en bonne concordance avec la courbe expérimentale (mesurée) par rapport à la méthode des trois points obtenu par fitting des deux courbes précédentes.

		Points caractéristiques de la courbe I-V					Valeurs des cinq paramètres					
		I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	I _{mp} (A)	V _{mp} (V)	P _{mp} (W)	I _{ph} (A)	I ₀ (A)	R _s (Ω)	R _{sh} (Ω)	m	
Mesuré		2,53	40,6	2,31	32,7	75,7						
méthode de cinq pts		2,46	41,65	2,25	33,8	76,16	2,46	3,12.10 ⁻⁸	1,01	950	1.2	
	ε _r (%)	2,76	-2,58	2,59	-3,36	-0,6	Δ	0	0.15.10 ⁻⁸	0.29	70	0.05
méthode de trois pts		2,46	43,49	2,28	34,31	78,45	2,46	2,97.10 ⁻⁸	1,3	1020	1.25	
	ε _r (%)	2,76	-7,11	1,29	-4,92	-3,63						

Tableau 3.6. Comparaisant des résultats des deux méthodes, cinq points et trois points du 1^{er} cas pour le modèle à une diode.

Le tableau (3.6) présente les résultats obtenu (valeurs des paramètres) par les deux méthodes (méthode de cinq points et méthode de trois points), ainsi que l'erreur relative calculé par l'équation (3.50) (ϵ_r en pourcentage) pour chaque méthode.

- Mesure 2

2^{ème} Cas: $G=614\text{W/m}^2$ et $T=43,5^\circ\text{C}$

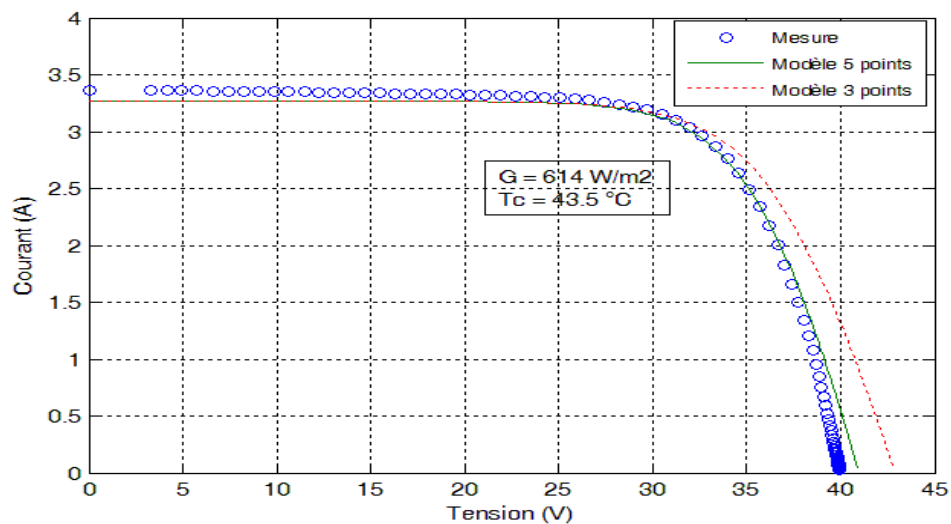


Figure 3.4. Caractéristiques I-V du 2^{ème} cas pour le modèle à une diode.

		Points caractéristiques de la courbe I-V					Valeurs des cinq paramètres					
		I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	I _{mp} (A)	V _{mp} (V)	P _{mp} (W)	I _{ph} (A)	I ₀ (A)	R _s (Ω)	R _{sh} (Ω)	m	
Mesuré		3,36	40.0	3,06	31,7	97,3						
méthode de cinq pts		3,26	40,9	2,95	32,52	96,14	3,26	1,52.10 ⁻⁸	0,98	720	1,2	
	ε _r (%)	2,97	-2,25	3,59	-2,58	1,19	Δ	0	6.98.10 ⁻⁸	0.27	278	0.05
méthode de trois pts		3,26	42,82	3	33	98,98	3,26	8.50.10 ⁻⁸	1,25	998	1,25	
	ε _r (%)	2,97	-7,05	1,96	-4,1	-1.72						

Tableau 3.7. Comparaison des résultats des deux méthodes, cinq points et trois points du 2^{ème} cas pour le modèle à une diode.

- Mesure 3

3^{ème} Cas: $G=794\text{W/m}^2$ et $T=40^\circ\text{C}$

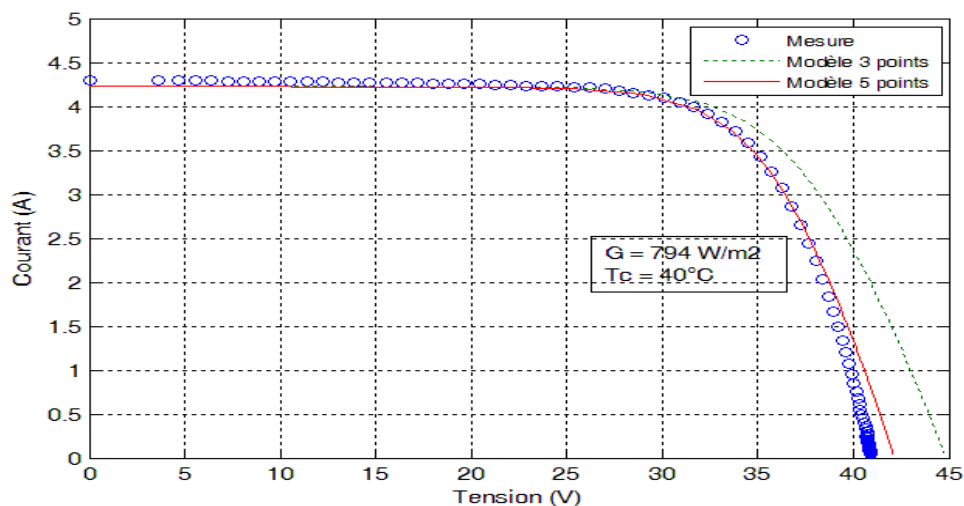


Figure 3.5. Caractéristiques I-V du 3^{ème} cas pour le modèle à une diode.

		Points caractéristiques de la courbe I-V					Valeurs des cinq paramètres				
		I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	I_{mp} (A)	V_{mp} (V)	P_{mp} (W)	I_{ph} (A)	I_0 (A)	R_s (Ω)	R_{sh} (Ω)	m
Mesuré		4,30	41,0	3,92	32,40	126,82					
méthode de cinq pts		4,22	41,65	3,97	31,78	126,30	4,22	$5,98 \cdot 10^{-8}$	0,95	600	1.2
	ϵ_r (%)	1,86	-1,58	-1,27	1,91	0,41	Δ 0	$0,69 \cdot 10^{-8}$	0,25	388	0,07
Méthode de trois pts		4,22	44,79	3,82	34,44	131,8	4,22	$5,39 \cdot 10^{-8}$	1,2	988	1.27
	ϵ_r (%)	1,86	-9,24	2,55	-6,29	-3,92					

Tableau 3.8. Comparaisant des résultats des deux méthodes, cinq points et trois points du 3^{ème} cas pour le modèle à une diode.

- Mesure 4

4^{ème} cas: $G=1050\text{W/m}^2$ et $T=50,3^\circ\text{C}$

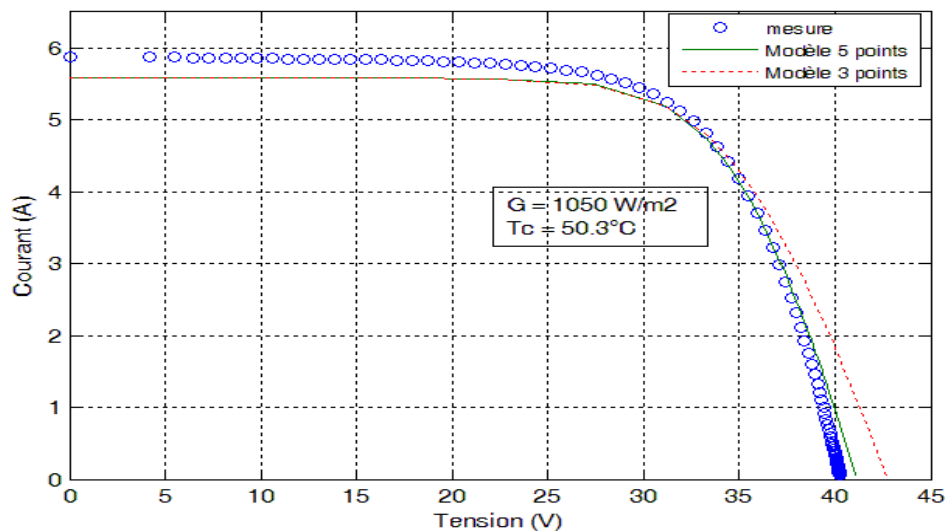


Figure 3.6. Caractéristiques I-V du 4^{ème} cas pour le modèle à une diode.

		Points caractéristiques de la courbe I-V					Valeurs des cinq paramètres				
		I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	I_{mp} (A)	V_{mp} (V)	P_{mp} (W)	I_{ph} (A)	I_0 (A)	R_s (Ω)	R_{sh} (Ω)	m
Mesuré		5,87	40,3	5,26	31,1	163,9					
méthode de cinq pts		5,58	41,09	5,18	31,13	161,5	5,58	$3,12 \cdot 10^{-8}$	0,70	400	1.2
	ϵ_r (%)	4,94	-1,96	1,52	-0,09	1,46	Δ 0	$11.8 \cdot 10^{-8}$	0.26	300	0.04
méthode de trois pts		5,58	42,69	5,19	31,16	161,8	5,58	$1,94 \cdot 10^{-7}$	0,96	700	1.24
	ϵ_r (%)	4,94	-5,93	1,33	-0,19	1,28					

Tableau 3.9. Comparaisant des résultats des deux méthodes, cinq points et trois points du 4^{ème} cas pour le modèle à une diode.

3.6.1. Modèle à deux diodes

Pour ce modèle (à deux diodes), on a près aussi quatre mesures (expérimentales) sous différentes condition de rayonnement G et température T .

- **Mesure**

1^{er} Cas: $G=463 \text{ W/m}^2$ et $T_c=35^\circ\text{C}$

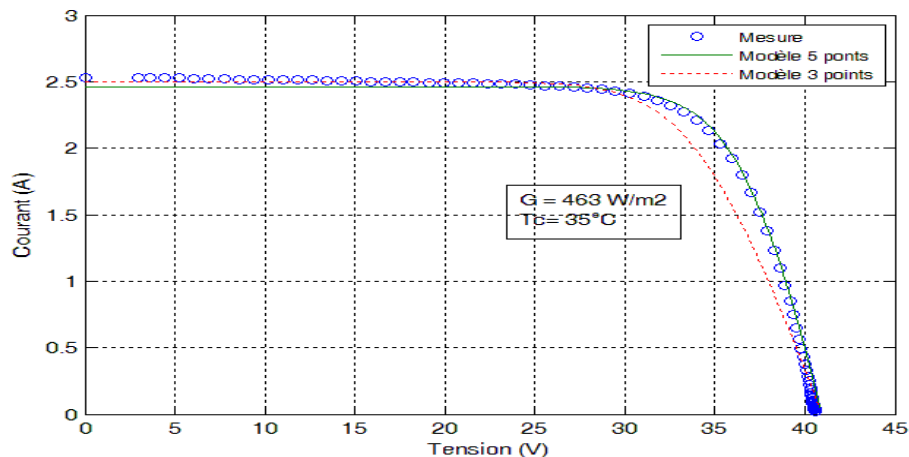


Figure 3.7. Caractéristiques I-V du 1^{er} cas pour le modèle à deux diodes,

	Points caractéristiques de la courbe I-V					Valeurs des cinq paramètres				
	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	I_{mp} (A)	V_{mp} (V)	P_{mp} (W)	I_{ph} (A)	I_{01} (A)	I_{02} (A)	R_s (Ω)	R_{sh} (Ω)
Mesuré	2,53	40,6	2,36	32,7	75,7					
méthode de cinq pts	2,46	40,85	2,34	32,8	76,83	2,46	$1,25 \cdot 10^{-9}$	$2,58 \cdot 10^{-5}$	1	500
ϵ_r (%)	2,76	-0,61	0,84	-0,30	-1,49	Δ 0,01	0	$0,02 \cdot 10^{-5}$	0,5	200
méthode de trois pts	2,5	40,84	2,5	30,69	72,47	2,5	$1,25 \cdot 10^{-9}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	1,5	700
ϵ_r (%)	1,18	-0,59	-5,93	6,14	4,26					

Tableau 3.10. Comparaisant des résultats des deux modèles, cinq points et trois points du 1^{er} cas pour le modèle à deux diodes

- **Mesure 2**

2^{ème} Cas: $G=794\text{W/m}^2$ et $T=40^\circ\text{C}$

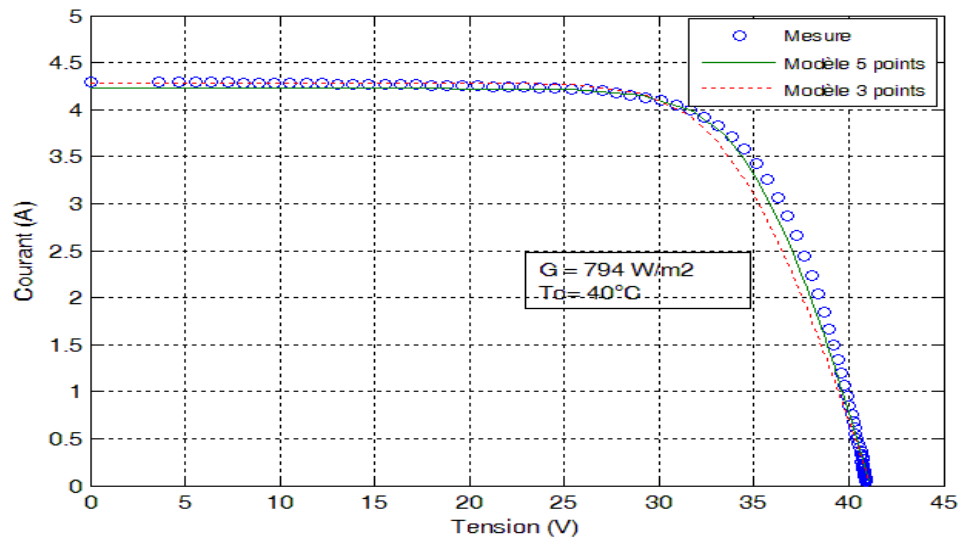


Figure 3.8. Caractéristiques I-V du 2^{ème} cas pour le modèle à deux diodes

		Points caractéristiques de la courbe I-V					Valeurs des cinq paramètres					
		I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	I _{mp} (A)	V _{mp} (V)	P _{mp} (W)	I _{ph} (A)	I ₀₁ (A)	I ₀₂ (A)	R _s (Ω)	R _{sh} (Ω)	
Mesuré		4,30	41	3,92	32,40	126,82						
méthode à cinq pts		4,22	41,08	3,97	31,83	126,6	4,22	2,71.10 ⁻⁹	23,48.10 ⁻⁵	0,95	490	
	ξ _r (%)	1,86	-0,19	-1,27	1,75	0,17	Δ	0.06	0	19.98.10 ⁻⁵	0.25	175
méthode à trois pts		4,28	41,1	3,94	31,54	124,3	4,28	2,71.10 ⁻⁹	3,5.10 ⁻⁵	1,2	565	
	ξ _r (%)	0,46	-0,24	-0,51	2,65	1,98						

Tableau 3.11. Comparaison des résultats des deux modèles, cinq points et trois points du 2^{ème} cas pour le modèle à deux diodes

- **Mesure 3**

3^{ème} Cas: $G=1050\text{W/m}^2$ et $T=50.3^\circ\text{C}$

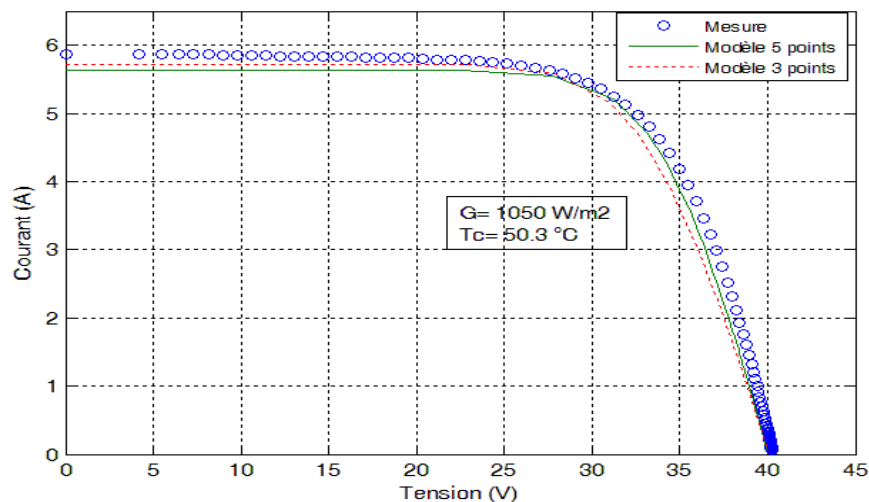


Figure 3.9. Caractéristiques I-V du 3^{ème} cas pour le modèle à deux diodes.

En remarque sur la figure (3.11) que la courbe de la méthode de cinq points est en bonne concordance avec la courbe expérimentale par rapport à la méthode de trois points.

	Points caractéristiques de la courbe I-V					Valeurs des cinq paramètres				
	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	I_{mp} (A)	V_{mp} (V)	P_{mp} (W)	I_{ph} (A)	I_{01} (A)	I_{02} (A)	R_s (Ω)	R_{sh} (Ω)
Mesuré	5,87	40,3	5,26	31,1	163,9					
Méthode à cinq pts	5,63	40	5,21	31,26	162,9	5,63	$1,23 \cdot 10^{-9}$	$4,22 \cdot 10^{-5}$	0,69	250
ϵ_r (%)	4,08	0,74	0,95	-0,51	0,61	Δ 0,09	0	$0,04 \cdot 10^{-5}$	0,16	250
Méthode à trois pts	5,72	40,02	5,16	31	160,1	5,72	$1,23 \cdot 10^{-9}$	$4,26 \cdot 10^{-5}$	0,85	500
ϵ_r (%)	2,55	0,69	1,90	0,32	2,31					

Tableau 3.12. Comparaison des résultats des deux méthodes, cinq points et trois points du 3^{ème} cas pour le modèle à deux diodes.

- Mesure 4

4^{ème} cas: $G=640\text{W/m}^2$ et $T=43,5^\circ\text{C}$

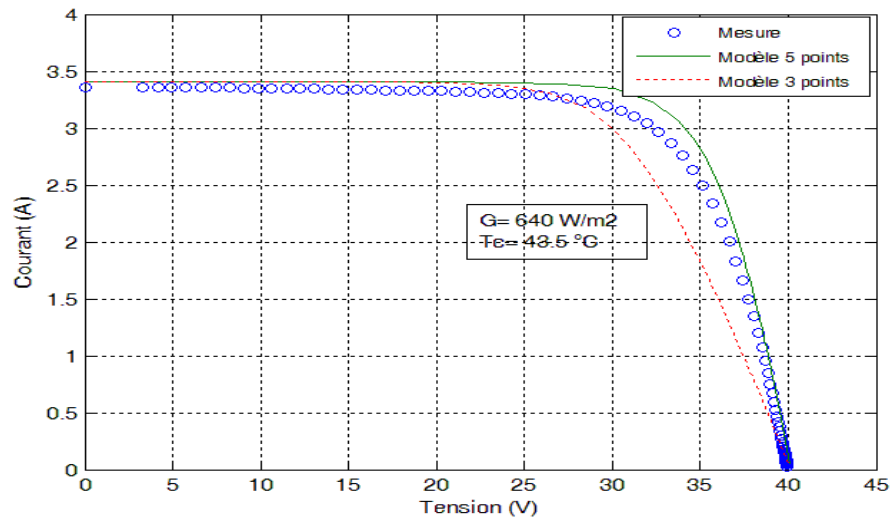


Figure 3.10. Caractéristiques I-V du 4^{ème} cas pour le modèle à deux diodes,

		Points caractéristiques de la courbe I-V					Valeurs des cinq paramètres					
		I _{sc} (A)	V _{oc} (V)	I _{mp} (A)	V _{mp} (V)	P _{mp} (W)	I _{ph} (A)	I ₀₁ (A)	I ₀₂ (A)	R _s (Ω)	R _{sh} (Ω)	
Mesuré		3,36	40,0	3,06	31,7	97,3						
Méthode à cinq pts		3,40	40,1	3,23	32,33	104,5	3,40	4,58.10 ⁻⁹	3,17.10 ⁻⁵	0,6	460	
	ε _r (%)	-1,19	-0,25	-5,55	-1,98	-7,39	Δ	0	0.01.10 ⁻⁹	0	1.4	290
Méthode à trois pts		3,40	40,04	3,17	28,54	90,48	3,40	4,59.10 ⁻⁹	3,17.10 ⁻⁵	2	750	
	ε _r (%)	-1,19	-0,10	-3,59	9,96	7,00						

Tableau 3.13. Comparaison des résultats des deux modèles, cinq points et trois points du 4^{ème} cas pour le modèle à deux diodes

3.7. Conclusion

L'utilisation des méthodes de trois points et cinq points pour l'extraction des paramètres des deux modèles (modèle à une diode et modèle à deux diodes) d'une cellule solaire nous a permis d'obtenir ces paramètres en utilisant seulement les trois points connus $(0, I_{sc}), (V_{mp}, I_{mp}), (V_{oc}, 0)$ sur la caractéristique I-V de la cellule solaire.

L'avantage des deux méthodes utilisées (méthode de cinq points et trois points) permet d'extraire les paramètres directement de la courbe expérimentale (mesurée).

Dans ce contexte, nous observons que le modèle de deux diodes nous a permis d'obtenir des paramètres qui représentent mieux le comportement de la cellule solaire par rapport au modèle à une diode.

On a utilisé un programme (MATLAB Simulink) pour la résolution et l'extraction des paramètres de la cellule solaire, il a été présenté dans ce chapitre.

Notre travail dans ce chapitre, nous a permis d'identifier les paramètres des différentes cellules solaires,

D'ailleurs, on a constaté que la méthode proposée (méthode de cinq points) représente mieux le comportement de la cellule,