

Deux nouvelles méthodes complémentaires pour l'extraction optimale des paramètres électriques des jonctions

Abdessamad Malaoui^{1*} et Abdelmajid Elmansouri²

¹ Laboratoire de Génie Industriel, Faculté Polydisciplinaire,
Université Sultan Moulay Slimane, Béni Mellal, Maroc

² Laboratoire de Physique de Solide et Couches Minces,
Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad, Marrakech, Maroc.

(reçu le 07 Février 2010 – accepté le 25 Juin 2010)

Résumé - Dans ce papier, deux nouvelles méthodes sont développées afin d'extraire les paramètres électriques I_0 , R_s , R_{sh} et η , du modèle à une exponentielle d'une jonction. La première est basée sur la comparaison et l'égalisation du modèle analytique d'une diode, et un modèle polynomial équivalent. Les dérivées des deux modèles, à l'origine des tensions, permettent de générer un système d'équations qui exprime les paramètres électriques en fonction des coefficients du modèle polynomial. La deuxième méthode développée, est articulée sur l'algorithme de Levenberg Marquardt, en utilisant une approche de la détermination et la pondération de la matrice Hessienne, à partir du modèle exponentiel. Les deux méthodes sont testées, à l'aide des programmes développés avec Matlab, sur deux bases de mesures I-V, réalisées par une diode de Schottky. Des comparaisons, de ces deux approches proposées, ont été effectuées la méthode numérique de Newton-Raphson et une autre graphique. Les résultats obtenus sont discutés sur le plan de la rapidité, la précision et l'ordre des erreurs statistiques définis. Ils montrent les limites de l'utilisation de ces deux approches et l'intérêt qu'elles présentent.

Abstract - In this paper, two new methods are developed to extract the electrical parameters I_0 , R_s , R_{sh} and η , of an exponential model of a junction. The first is based on comparing the analytical model of a diode, and a polynomial model equivalent. The derivatives of the two models at $v = 0$, can generate a system of equations that expresses the electrical parameters in the coefficients of the polynomial model. The second method developed is articulated on the Levenberg Marquardt algorithm, using an approach to identifying and weighting of the Hessian matrix. Both methods are tested, using programs developed with Matlab, on two bases I-V measurements, by a Schottky diode. Comparisons of these two proposed approaches have been made with a graphical method and the Newton-Raphson. The search results were discussed in terms of speed, precision and order of statistical errors defined. They show a great interest to use these two approaches.

Mots clés: Paramètres électriques d'une diode - Caractéristique I-V - Algorithme de Levenberg Marquadt - Modèle polynomial - Méthode numérique.

1. INTRODUCTION

Les composants électroniques à base des jonctions, telles que les cellules photovoltaïques, les capteurs à semi-conducteurs, les plaques à effet thermoélectriques, les diodes de Schottky et autres, connaissent une grande focalisation scientifique et technique dans les dernières années, car elles présentent un grand intérêt économique, énergétique et environnemental.

* a.malaoui@ucam.ac.ma ; a.elmansouri@ucam.ac.ma

Le fonctionnement de ces composantes est décrit généralement par la caractéristique $I = f(V)$ qui permet de donner des informations sur les mécanismes du transport électrique interne et sur les imperfections des étapes technologiques de ses fabrications [1, 2]. Cette caractéristique dépend de plusieurs paramètres électriques, tels que la résistance série R_s , la résistance shunt R_{sh} , le courant de saturation I_0 et le facteur d'idéalité η [3, 4]. La connaissance, avec précision, de ces paramètres, permet de comprendre et d'expliquer certains phénomènes électriques dans ces jonctions [5-7].

Elle nous aide, également, à concevoir des dispositifs répondants à des spécifications bien déterminées, au niveau de la fiabilité, le rendement, la consommation et autres [8].

Parmi les défis rencontrés dans ce domaine, la détermination avec une grande précision, de ces paramètres doit être effectuée. Plusieurs méthodes graphiques, analytiques et numériques ont été utilisées pour extraire et optimiser ces derniers [9-11]. Chacune de ces méthodes, présente des inconvénients, soit au niveau de la complexité de l'utilisation et la précision, soit au niveau de la convergence et la rapidité [12].

Dans le présent travail, deux nouvelles approches sont présentées pour contribuer à l'amélioration d'une solution optimale de ces défis. La première est une nouvelle technique numérique, basée sur la comparaison d'un modèle analytique existant avec un autre modèle polynomial équivalent. La deuxième méthode s'articule sur le développement d'un algorithme utilisant les itérations de Levenberg Marquardt (LM) [13]. Les deux méthodes sont testées sur une diode de Schottky à l'aide de Matlab.

2. MODELISATION DE BASE

Dans la littérature, plusieurs modèles décrivent les échantillons à semi-conducteurs, en particulier les diodes [14]. Le modèle analytique le plus simple est celui d'une jonction idéale, son modèle est donné par l'expression suivante:

$$I = I_0 \left[\exp\left(\frac{v}{\eta V_T}\right) - 1 \right] \quad (1)$$

Avec v , la tension de polarisation de la jonction, $V_T = \eta k T / q \approx 26 \text{ V}$ à la température ambiante, q a charge d'électron, k la constante de Boltzman, T est la température absolue, η le facteur d'idéalité ou de qualité, il prend la valeur 1 s'il s'agit d'un mécanisme de diffusion et la valeur 2 pour un mécanisme de recombinaison [15].

Une valeur intermédiaire de η , indique que les deux sont comparables, et une valeur supérieure à 2 indique la présence d'autres mécanismes de transport du courant dans la jonction [16]. I_0 est le courant de saturation de la jonction donné par l'équation suivante [17]:

$$I_0 = A \times A^* T^2 \times \exp\left(-\frac{\Phi_B}{V_T}\right) \quad (2)$$

Avec A la surface de contact de la jonction, A^* la constante de Richardson, qui dépend de ma masse effective et Φ_B la hauteur de la barrière de potentiel.

D'autres modèles représentent mieux l'état électrique de la jonction. Il s'agit des modèles, comme ceux d'une seule exponentielle (3) et ceux à deux exponentielles (4), ses caractéristiques courant-tension sont données par [18, 19]:

$$I = I_0 \left(e^{\frac{v - I \times R_s}{\eta V_T}} - 1 \right) + \frac{v - I \times R_s}{R_{sh}} \quad (3)$$

$$I = I_{0d} \cdot \left(e^{\frac{v - I \times R_s}{\eta V_T}} - 1 \right) + I_{0r} \cdot \left(e^{\frac{v - I \times R_s}{\eta V_T}} - 1 \right) + \frac{v - I \times R_s}{R_{sh}} \quad (4)$$

R_s est la résistance série, due à la résistance du contact ohmique métal semi-conducteur, R_{sh} est la résistance shunt qui correspond à la présence d'un courant de fuite dans la diode, I_{0d} et I_{0r} sont respectivement le courant de diffusion et le courant de recombinaison.

Les cellules solaires peuvent être représentées, également, par le modèle à deux diodes [20-22], ou par celui d'une seule diode [23-25]:

$$I_{od} = I_{ph} - I_d - I_p = I_s \cdot \left(e^{\frac{V + I \times R_s}{\eta \times V_T}} - 1 \right) - \frac{V + I \times R_s}{R_{sh}} \quad (5)$$

I_{ph} , I_d , I_p et I_s sont respectivement le photocourant, le courant diode, le courant shunt et le courant de saturation.

3. METHODES PROPOSEES

L'extraction des paramètres électriques des jonctions est effectuée par nombreuses façons. Les méthodes les plus utilisées sont: la méthode d'analyse graphique [26], la méthode du gradient [27], la méthode de Newton [28], la méthode quasi-Newton [29], la méthode de Newton-Raphson [30] et celle de Levenberg Marquardt [13].

Par la suite, nous traitons les deux méthodes proposées:

3.1 Première méthode- Méthode polynomiale

C'est une technique basée sur la comparaison et l'égalisation du modèle exponentiel du courant d'une diode {équation (3)}, et un modèle polynomial équivalent {équation (6)}. L'égalité de ces deux modèles, à l'origine des tensions ($v = 0$), permet de d'exprimer les paramètres électriques en fonction des coefficients du modèle polynomial (a_n). Cette technique se déroule en deux étapes:

- L'étape 1, consiste à utiliser un courant estimateur polynomial $\tilde{I}(v)$ pour résoudre le problème du courant implicite de l'équation (3), tel que:

$$\tilde{I}(v) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i \cdot v^i = a_0 + a_1 \cdot v + a_2 \cdot v^2 + a_3 \cdot v^3 + \dots + a_n \cdot v^n - \text{Err}(v) \quad (6)$$

$$\text{Avec } \text{Err}(v) = \sum_{i=n+1}^{\infty} a_i \cdot v^i$$

Cet estimateur doit vérifier l'équation (3) tel que:

$$\tilde{I}(v) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i \cdot v^i = I_0 \cdot \left(e^{\frac{v - \tilde{I} \cdot R_s}{\eta T}} - 1 \right) + \frac{v - \tilde{I} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (7)$$

Il utilise le fait que les dérivées à l'origine, sont proportionnelles aux coefficients (a_n) de l'estimateur $\tilde{I}(v)$, tel que:

$$\tilde{I}(0) = a_0, \quad \frac{d\tilde{I}}{dv}(0) = a_1, \quad \frac{d^2\tilde{I}}{d^2v}(0) = 2 \cdot a_2, \quad \frac{d^3\tilde{I}}{d^3v}(0) = 6 \cdot a_3, \quad \frac{d^n\tilde{I}}{d^n v}(0) = n! \cdot a_n \quad (8)$$

Le choix de cet estimateur polynomial vient du fait qu'il est infiniment dérivable, et que l'erreur et ses dérivées d'ordre (n), sont nulles à l'origine, comme suivant:

$$\text{Err}(v) = \sum_{i=n+1}^{\infty} a_i \cdot v^i \Big|_{v=0} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{d^n \text{Err}(v)}{d^n v} \Big|_{v=0} = 0 \quad (9)$$

De plus, les coefficients (a_n) sont facilement à estimer (fonction *polyfit* de *Matlab* par exemple) [31].

- L'étape 2, permet de combiner les deux modèles (3) et (6), en utilisant les dérivées du courant estimateur $\tilde{I}(v)$ par rapport à v . La dérivée jusqu'à l'ordre 3, suffit de déterminer un système de 4 équations avec les 4 inconnus (R_s , R_{sh} , I_0 et η).

Les notations suivantes, seront utilisées par la suite, pour indiquer les trois dérivées par rapport à v : $\frac{d\tilde{I}(v)}{dv} = \tilde{I}'$, $\frac{d^2\tilde{I}(v)}{d^2v} = \tilde{I}''$, $\frac{d^3\tilde{I}(v)}{d^3v} = \tilde{I}'''$. On obtient le système suivant:

$$\tilde{I} \cdot \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) = I_0 \cdot \left[\exp\left(\frac{v - R_s \cdot I}{k} \right) - 1 \right] + \frac{v - R_s \cdot I}{R_{sh}}, \quad k = \eta \cdot V_T \quad (10)$$

$$\tilde{I}' \cdot \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) = \frac{1}{R_{sh}} + \frac{I_0}{k} \cdot (1 - R_s \cdot \tilde{I}') \cdot \exp\left(\frac{v - R_s \cdot \tilde{I}}{k} \right) \quad (11)$$

$$\tilde{I}'' \cdot \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) = \left[\frac{1}{k} (-R_s \cdot \tilde{I}'') + \frac{I_0}{k} \cdot (1 - R_s \cdot \tilde{I}')^2 \right] \cdot \exp\left(\frac{v - R_s \cdot \tilde{I}}{k}\right) \quad (12)$$

$$k^2 \cdot \tilde{I}''' \cdot \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) = \left[I_0 \cdot k \cdot (1 - R_s \cdot \tilde{I}')^3 + I_0 \cdot k \cdot R_s \cdot \tilde{I}''' - I_0 \cdot R_s \cdot \tilde{I}'' \cdot (1 - R_s \cdot a_1) - 2 \cdot I_0 \cdot k \cdot R_s \cdot (1 - R_s \cdot \tilde{I}') \right] \cdot \exp\left(\frac{v - R_s \cdot \tilde{I}}{k}\right) \quad (13)$$

A l'origine des tensions ($v = 0$), et en tenant compte des équations (8), on obtient:

$$\frac{a_0}{I_0} \cdot \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) + 1 = \exp\left(\frac{a_0 \cdot R_s}{k}\right) \quad (14)$$

$$\frac{a_0}{I_0} \cdot \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) = \frac{1}{R_{sh}} + \frac{I_0}{k} (1 - R_s \cdot a_1) \times \exp\left(\frac{a_0 \cdot R_s}{k}\right) \quad (15)$$

$$2 a_2 \cdot \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) = \left[\frac{I_0}{k} (1 - R_s \cdot a_0)^2 - \frac{2 a_2 \cdot R_s \cdot I_0}{k} \right] \times \exp\left(\frac{a_0 \cdot R_s}{k}\right) \quad (16)$$

$$6 a_3 k^2 \cdot \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}}\right) = \left[I_0 \cdot k \cdot (1 - R_s \cdot a_1)^3 - 6 a_3 I_0 R_s - 2 a_2 \cdot R_s \cdot I_0 (1 - R_s \cdot a_1) - 2 I_0 k R_s \cdot (1 - R_s \cdot a_1) \right] \times \exp\left(\frac{a_0 \cdot R_s}{k}\right) \quad (17)$$

La résolution numérique de ce système non linéaire est faisable par plusieurs méthodes (par exemple par la fonction fsolve de Matlab). Des approximations pourront être effectuées pour simplifier ce système, selon la nature de la caractéristique I-V de chaque jonction, ce qui permet une solution analytique de ce système.

3.2 Deuxième méthode- Méthode LM

Elle utilise un algorithme développé à base des itérations de Levenberg Marquardt (LM), pour estimer, d'une manière optimale les paramètres électriques R_s , R_{sh} , I_0 et η .

Cet algorithme développé est le suivant:

- 1- Début
- 2- Mesure de $I(v)$
- 3- Valeurs initiales de R_{s0} , R_{sh0} , I_{00} , η_0 , epsilon, λ .
- 4- Calcul de $\hat{I}(v) = I_{calcul}$
- 5- Calcul de l'erreur $Er_1 = \hat{I}(v) - I(v)$
- 6- Calcul des dérivées de $I(v)$ par rapport à R_s , R_{sh} , I_0 et η et calcul du jacobéen J

- 7- Calcul des nouveaux paramètres R_s , R_{sh} , I_0 et η
- 8- Calcul la nouvelle erreur $Er_2 = \hat{I}(v) - I(v)$
et calcul de l'erreur: Erreur = abs($Er_1 - Er_2$)
- 9- Si Erreur < epsilon alors aller à 15
- 10- Calcul de $\hat{I}(v)$ et tester si $\hat{I}_{j+1} > \hat{I}_j$
alors remplacer λ par $\lambda * 10$ et aller à 15
- 11- Calcul de la nouvelle matrice Jacobéenne J et la matrice Hessienne H
- 12- Calcul des nouveaux paramètres R_s , R_{sh} , I_0 et η
- 13- Calcul de la nouvelle Erreur et du nombre d'itérations j
- 14- Retour à l'étape 9
- 15- Affichage des valeurs des paramètres R_s , R_{sh} , I_0 et η
et les indicateurs statistiques.
- 16- Traçage des courbes I–V
- 17- Fin

La modification des paramètres se fait selon la relation:

$$P_j = P_{j-1} - [H_{j-1} + \lambda_{j-1} \cdot I]^{-1} \times \nabla J_{j-1} \quad (18)$$

Avec P, **Erreur ! Des objets ne peuvent pas être créés à partir des codes de champs de mise en forme.** et H sont respectivement le vecteur des paramètres électriques à estimer, le Jacobéen et le Hessien. Le pas d'itérations est ($1/\lambda_{j-1}$).

Le calcul de la matrice jacobéenne est basé sur les dérivées de l'équation (3) par rapport aux paramètres électriques R_s , R_{sh} , I_0 et η , comme suivant:

$$\frac{\partial I(v)}{\partial R_s} = - \frac{I(v) \cdot \left(\frac{1}{R_{sh}} + \frac{I_0}{k} \cdot e^{dd} \right)}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}} + \frac{I_0 \cdot R_s}{k} \cdot e^{dd}} \quad (19)$$

$$\frac{\partial I(v)}{\partial R_{sh}} = - \frac{\frac{v - I \cdot R_s}{R_{sh}^2}}{1 + \frac{R_s}{R_{sh}} + \frac{I_0 \cdot R_s}{k} \cdot e^{dd}} \quad (20)$$

$$\frac{\partial I(v)}{\partial k} = - \frac{I_0 \cdot \left[\frac{v - I \cdot R_s}{k^2} \right] \cdot e^{dd}}{1 + \frac{I_0 \cdot R_s}{k} \cdot e^{dd}} \quad (21)$$

$$\frac{\partial I(v)}{\partial I_0} = \frac{e^{dd} - 1}{1 + \frac{I_0 \cdot R_s}{k} \cdot e^{dd}} \quad (22)$$

$$\text{Avec : } dd = \frac{-R_s \cdot a_0}{k}.$$

4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

Pour valider les méthodes proposées, plusieurs tests ont été effectués sur une diode de Schottky 'ITO/POT/Al' à base de poly(o-toluidine), déposée avec la technique de 'spincoating', par notre équipe de recherche [32].

Des bases de données mesurées I-V ont été utilisées dans cette étude, pour tester et valider les approches proposées. Ces mesures ont été prises par un dispositif électronique automatisé, que nous avons conçu et réalisé [33].

Les valeurs I-V obtenues sont filtrées par une technique de contrôle de qualité [34]. Une première base est constituée de 38 mesures et une deuxième de 179 mesures. Une comparaison, des techniques proposées, est effectuée avec une méthode graphique [26], et de la technique numérique de Newton-Raphson [30].

Les valeurs obtenues sont comparées par les erreurs statistiques suivantes: l'écart-type (SD), la racine carrée de la moyenne normalisée (NRMSE), l'erreur moyenne systématique normalisée (NMBE), le 't-statistique', définis par les relations suivantes [35] :

$$SD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{j=1}^N (I_j - \hat{I}_j)^2} \quad \text{et} \quad NRMSE = \frac{\left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (I_j - \hat{I}_j)^2 \right)^{1/2}}{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I_j} \quad (23), (24)$$

$$NMBE = \frac{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\hat{I}_j - I_j)}{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I_j} \quad \text{et} \quad t = \sqrt{\frac{(N-1) MBE^2}{(RMSE^2 - MBE^2)}} \quad (25), (26)$$

Où MBE et RMSE définies par:

$$RMSE = \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\hat{I}_j - I_j)^2 \right)^{1/2} \quad \text{et} \quad MBE = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\hat{I}_j - I_j) \quad (27), (28)$$

Avec \hat{I}_j , I_j sont respectivement, la valeur du courant estimé et celui mesuré, à l'itération j , et N est le nombre de mesures.

Les tests sont effectués sur la base de mesures I-V, constituée de 38 points mesurés, allant de (5 μ A ; 28,35 mV) à (243,36 μ A ; 529,07 mV), comme indiqué sur la figure 1. Pour voir l'influence du degré (n) du polynôme fit sur les résultats de la méthode polynomiale, 5 valeurs du degré n sont prises.

Les valeurs des coefficients (a_n) trouvées {équations (14-17)}, sont présentées dans le **Tableau 1**. Les valeurs des paramètres électriques trouvées par cette méthode polynomiale, sont regroupées sur le **Tableau 2**.

Tableau 1: Valeurs des coefficients (a_n) calculées par le fit polynomial

Degré (n)	n = 3	n = 4	n = 6	n = 9	n = 11
$a_0 (10^{-6})$	-3,33734383	-4,04688255	-6,97598653	-5,87958807	-13,3888497
$a_1 (10^{-4})$	2,72068742	2,92706956	5,21332038	5,74080617	14,9809205
$a_2 (10^{-4})$	-3,49741595	-5,06983556	-54,3162229	-104,532749	-529,742485
$a_3 (10^{-3})$	1,38232320	1,81562207	43,3978432	152,833798	1136,23084

Tableau 2: Résultats trouvés par la méthode polynomiale, pour la base de petite taille

Degré (n)	n = 3	n = 4	n = 6	n = 9	n = 11	Moyenne
$R_s (\Omega)$	35,80	35,78	33,96	34,48	34,80	34,964
$R_{sh} (k\Omega)$	06,59	06,59	06,59	06,60	06,60	06,594
$I_0 (\mu A)$	19,19	14,01	16,98	18,07	16,57	16,96
η	06,00	06,00	06,00	05,99	05,98	05,994

Il est clair de ce tableau, que les valeurs des paramètres R_s , R_{sh} , I_0 et η , obtenues par cette première méthode, fluctuent en fonction des coefficients (a_n) du fit polynomial. En effet, l'erreur sur la résistance série R_s est de l'ordre de $1,84 \Omega$, ce qui est équivalent à une erreur relative de l'ordre de $5,26 \%$.

Aussi, l'erreur sur la résistance de shunt R_{sh} est de 10Ω , ce qui correspond à une erreur relative de $0,15 \%$. Une fluctuation importante, de $5,18 \mu A$ est observée sur le courant de saturation, qui représente une erreur relative de $30,5 \%$.

Par contre, une très faible erreur relative, de l'ordre de $0,33 \%$, est remarquée sur le facteur d'idéalité. Pour la même base, et dans les mêmes conditions de la méthode de Newton-Raphson, le **Tableau 3** regroupe les résultats de comparaison de cette dernière avec la technique graphique et celle de (LM).

Tableau 3: Comparaison des paramètres électriques par les trois méthodes

Paramètres	Méthode graphique	Méthode Newton-Raphson	Méthode LM
$R_s (\Omega)$	1125	37,45	36,34
$R_{sh} (k\Omega)$	04,31	07,23	06,63
$I_0 (\mu A)$	16,57	07,94	08,44
η	09,00	06,26	06,54

Ces résultats montrent que les deux méthodes numériques (Newton-Raphson et LM), donnent des valeurs, des paramètres électriques, rapprochées l'une de l'autre. Il est remarqué, également que ces valeurs sont proches de celles de la première méthode (méthode polynomiale).

Par contre, la méthode graphique donne des valeurs loin des autres techniques, ce qui justifie qu'elle est non précise. Donc, pour savoir quelle est la technique la plus précise de ces trois méthodes numériques, les indicateurs statistiques sont calculés et sont comparés, comme indique le **Tableau 4**.

Tableau 4: Indicateurs statistiques des trois méthodes

Indicateurs Statistiques	Méthode de Newton-Raphson	Méthode L M	Méthode Polynomiale
SD	$3,67 \cdot 10^{-6}$	$2,58 \cdot 10^{-6}$	$8,03 \cdot 10^{-5}$
NMBE	$-3,69 \cdot 10^{-3}$	$1,80 \cdot 10^{-3}$	$8,65 \cdot 10^{-1}$
NRMSE	$4,12 \cdot 10^{-2}$	$2,89 \cdot 10^{-2}$	1,24
t-statistique	$5,47 \cdot 10^{-1}$	$3,80 \cdot 10^{-1}$	5,86
Nombre d'itérations	1212	89	9

L'indicateur NMBE fournit l'information en ce qui concerne l'excédent ou la sous-estimation des paramètres estimés. Une valeur positive de NMBE implique une surestimation des valeurs, alors que les valeurs négatives indiquent une sous-estimation.

Le NRMSE fournit des informations sur la performance à court terme de la totalité du modèle, en permettant la comparaison terme par terme, de la différence réelle entre les valeurs estimées et mesurées du courant électrique. Généralement, une valeur plus basse de l'indicateur NRMSE, signifie une bonne performance du modèle avec les paramètres trouvés.

L'obtention d'une valeur très petite de l'erreur 't-statistique', indique une bonne performance du modèle. Selon ces indicateurs, la méthode polynomiale ne donne pas des résultats précis par rapport à celle de Newton-Raphson et celle de LM.

Par contre, elle est très rapide d'environ 10 fois que LM et de plus de 134 fois que celle de Newton-Raphson. On note également, que la technique LM développée est très rapide de plus de 13 fois, et précise d'environ 2 fois, que celle de Newton-Raphson.

Pour augmenter la rapidité de la méthode LM développée, on exploite la méthode polynomiale, en utilisant les résultats y trouvés comme des valeurs initiales. Une comparaison avec celle de Newton-Raphson est effectuée, sur deux bases de données mesurées.

La première base est celle de petite taille, déjà utilisée (38 mesures), et une deuxième de taille élevée.

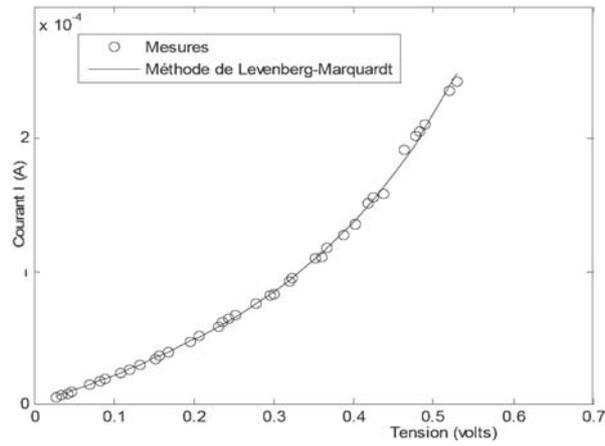


Fig. 1: Mesures et estimation, de la base de petite taille, par la méthode LM.

Cette dernière est constituée de 179 mesures I-V, allant de (-88,41 μ A; -702,95mV) à (322,85 μ A; 612,19mV), comme le montre la figure 2.

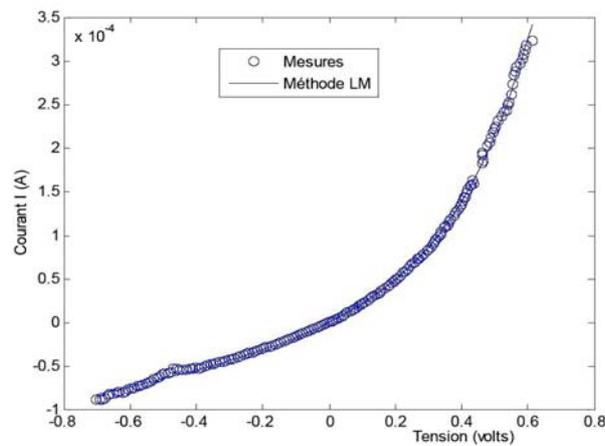


Fig. 2: Mesures et estimation, de la base de grande taille, par la méthode LM

Les résultats de cette comparaison, au niveau du nombre des itérations, sont représentés sur le **Tableau 5**.

Tableau 5: Itérations avec les résultats de la méthode polynomiale

Nombre d'itérations	Méthode Newton-Raphson	Méthode LM développée
Base de petite taille	327	07
Base de taille élevée	896	21

Les résultats de ce tableau montrent que l'utilisation de la méthode polynomiale développée précédemment, permet d'accélérer la convergence des deux algorithmes numériques utilisés.

En revanche, la technique LM développée reste toujours la plus rapide et la plus précise, elle devient plus rapide que celle de Newton plus de 42 fois, en utilisant les valeurs trouvées par la première méthode comme des conditions initiales.

Donc, même si la méthode polynomiale est la plus rapide que toutes les méthodes utilisées, elle présente l'inconvénient de la précision, mais elle peut être expertisée pour compléter la deuxième méthode LM développée, par la génération d'une gamme des valeurs initiales qui permet de rendre cette dernière très rapide que toutes les autres méthodes.

5. CONCLUSION

Le travail présenté, traite deux nouvelles techniques développées pour optimiser l'extraction des paramètres électriques de la caractéristique I-V du modèle à une exponentielle d'une jonction.

La première technique expertise l'équivalence entre le modèle analytique de cette diode, et le modèle polynomial, d'ordre supérieur à 3, équivalent. Elle utilise les dérivées du modèle exponentiel à l'origine des tensions, pour résoudre un système de 4 équations à 4 inconnues, qui sont les paramètres électriques recherchés.

La seconde méthode est développée à base de l'algorithme de Levenberg Marquardt, en simplifiant son hessien. La comparaison de ces deux approches avec la méthode graphique standard, montre que cette dernière ne donne pas des valeurs précises des paramètres à extraire.

En revanche, la comparaison avec la méthode numérique de Newton-Raphson, montre que la méthode polynomiale n'est pas tout à fait, précise devant les méthodes numériques. Elle prouve également, que la seconde méthode LM développée, est plus rapide et précise devant celle de Newton.

D'autre part, la première méthode polynomiale pourra être combinée avec celle de LM pour former une méthode puissante et performante au niveau de la rapidité et la précision, comme les montres les indicateurs statistiques et les nombres des itérations, trouvés.

REFERENCES

- [1] K. Yamaguchi and H. Kodera, '*Optimum Design of Triode-Like JFET's by Two-Dimensional Computer Simulation*', IEEE Transaction on Electron Devices, Vol.ED-24, N°8, pp. 1061 - 1069, 1977.
- [2] E. Bendada, K. Raïs et P. Mialhe, '*Caractérisation des Dégradations de Transistors MOS de Puissance sous Irradiations*', Journal de Physique III, Vol. 7, N°11, pp. 2131 – 2143, 1997.
- [3] S.M. Sze, '*Physics of Semiconductor Devices*', JohnWiley, New York, 1981.
- [4] A. Schenk and U. Krumbein, '*Coupled Defect-Level Recombination: Theory and Application to Anomalous Diode Characteristics*', Journal of Applied Physics, Vol. 78, N°5, pp. 3185 – 3192, 1995.
- [5] N.F. Mott, '*Metal-Insulator Transitions*', Second Edition, Taylor & Francis, London, 1990.

- [6] A. Sertap Kavasoglu, F. Yakuphanoglu, N. Kavasoglu, O. Pakma, O. Birgi and S. Oktik, 'The Analysis of the Charge Transport Mechanism of n-Si/MEH-PPV Device Structure Using Forward Bias I-V-T Characteristics', Journal of Alloys and Compounds, Vol. 492, N°162, pp. 421 – 426, 2010.
- [7] A.P. Alivisatos, 'Semiconductor Clusters, Nanocrystals, and Quantum Dots', Science, Vol. 271, N°5251, pp. 933 – 937, 1996.
- [8] O. Breitenstein, J. Bauer and J.P. Rakotoniaina, 'Material-Induced Shunts In Multicrystalline Silicon Solar Cells', Semiconductors, Vol. 41, N°4, 440 – 443, 2007.
- [9] C.D. Lien, F.C.T. So and M.A. Nicolet, 'An Improved Forward I-V Method for Non-Ideal Schottky Diodes with High Series Resistance', IEEE Transactions Electron Dev., ED-31, pp. 1502 – 1503, 1984.
- [10] K. Sato and Y. Yasumura, 'Study of Forward I-V Plot for Schottky Diodes with High Series Resistance', Journal of Applied Physics, Vol. 58, pp. 3655 – 3657, 1985.
- [11] SK. Cheung and NW. Cheung, 'Extraction of Schottky Diode Parameters from Forward Current-Voltage Characteristics', Applied Physics Letters, Vol. 49, N°2, pp. 85 – 87, 1986.
- [12] A. Ortiz-Conde, Y. Ma, J. Thomson, E. Santos, J.J. Liou, F.J. García Sánchez, M. Lei, J. Finol, and P. Layman, 'Direct Extraction of Semiconductor Device Parameters Using Lateral Optimization Method', Solid-State Electron., Vol. 43, N° , pp. 845 – 848, 1999.
- [13] D. Marquardt, 'An Algorithm for Least Squares Estimation of Nonlinear Parameters', SIAM Journal of Applied Math, Vol. 11, pp. 431 – 441, 1963.
- [14] A. Malaoui, E. Bendada, M. Mabrouki, M. Ankrim and K. Quotb, 'A New Approach of a Precise Electric Modeling of the Semiconductors and Dielectrics', IEEE International Conference on Microelectronics, (ICM'09), pp. 232 – 235, 2009.
- [15] H.K. Henisch, 'Semiconductor Contacts', Oxford University, London, 1984.
- [16] S. Zhu, R.L. Van Meirhaeghe, S. Forment, G.P. Ru, X.P. Qu and B.Z. Li, 'Schottky Barrier Characteristics of Ternary Silicide $CO_{1-x}Ni_xSi_2$ on n-Si (1 0 0) Contacts Formed by Solid Phase Reaction of Multilayer', Solid-State Electronics, Vol. 48, N°7, pp. 1205 – 1209, 2004.
- [17] P.G. Mc Cafferty, A. Sellai, P. Dawson and H. Elabd, 'Barrier Characteristics of PtSi/p-Si Schottky Diodes as Determined from I-V-T Measurements', Solid-State Electronics, Vol. 39, N°4, pp. 583 – 592, 1996.
- [18] A. Ortiz-Conde, F.J. Garcia Sanchez and J. Muci, 'Exact Analytical Solutions of the Forward Non-Ideal Diode Equation with Series and Shunt Parasitic Resistances', Solid State Electronics, Vol. 44, N°10, pp. 1861 – 1864, 2000.
- [19] E. Bendada, A. Malaoui, M. Mabrouki, K. Quotb and K. Rais, 'Annealing of Irradiated-Induced Defects in Power Mosfets', IEEE International Conference on Microelectronics, (ICM'09), pp. 236 - 239, 2009.

- [20] A. Kaminski, J.J. Marchand and A. Laugier, '*I-V Methods to Extract Junction Parameters with Special Emphasis on Low Series Resistance*', Solid-State Electronics, Vol. 43, N°4, pp. 741 – 745, 1999.
- [21] M. Wolf, G.T. Noel and R.J. Strin, '*Investigation of the Double Exponential in the Current-Voltage Characteristics of Silicon Solar Cell*', IEEE Transaction on Electron Devive, Vil. ED-24, N°4, pp. 419 – 428, 1977.
- [22] E.E. van Dyk and E.L. Meyer, '*Analysis of the effect of Parasitic Resistance on the Performance of Photovoltaic Modules*', Renewable Energy, Vol. 29, N°3, pp. 333 - 334., 2004.
- [23] Z. Ouenoughi and M. Chegaar, '*Simpler Method for Extracting Solar Cell Parameters using the Conductance Method*', Solid-State Electronics, Vol. 43, N°11, pp. 1985 – 1988, 1999.
- [24] M. Chegaar, Z. Ouenoughi and A. Hoffmann, '*A New Method for Evaluating Illuminated Solar Cell Parameters*', Solid-State Electronics, Vol. 45, N°2, pp. 293 – 296, 2001.
- [25] A. Ortiz-Conde, F.J. García Sánchez and J. Muci, '*New Method to Extract the Model Parameters of Solar Cells from the Explicit Analytic Solutions of their Illuminated I-V Characteristics*', Solar Energy Materials and Solar Cells, Vol. 90, N°11, pp. 352 – 361, 2006.
- [26] A. Oueriagli, H. Kassi, S. Holchandani and R.M. Leblanc, '*Analysis of Dark Current-Voltage Characteristics of Al/chlorophyll a/Ag Sandwich Cells*', Journal of Applied Physics, Vol. 71, N°11, pp. 5523 – 5530, 1992.
- [27] Y. Nesterov, '*Introductory Lectures on Convex Optimization: A Basic Course*', Applied Optimization, Kluwer Academy Publishers, Boston, 2004.
- [28] T. Easwarakhanthan, J. Bottin, I. Bouhouch and C. Boutrit, '*Nonlinear Minimization Algorithm for Determining the Solar Cell Parameter with Microcomputers*', International Journal of Sustainable Energy, Vol. 4, N°1, pp. 1 – 12, 1986.
- [29] B.T. Polyak, '*Introduction to Optimization on Multistep Gradient Methods*', 1987.
- [30] WH. Press, WT. Vettering and SA. Teukolsky, '*Numerical Recipes in C: The Art of Scientific Computing*', 2nd Ed. Cambridge University Press, Vol. 9, pp. 362 – 367, 2002.
- [31] A. Malaoui, R. Iqdour, M. Benhayoun, A. Zeroual, M. Ankrim and K. Quotb, '*New Model for Ultrasonic Velocity with Temperature in Pure Water*', Journal AMSE, Vol. 74, N°1, pp. 63 – 73, 2005.
- [32] A. Elmansouri, A. Outzourhit, A. Lachkar, N. Hadik, A. Abouelaoualim, M.E. Achour, A. Oueriagli and E.L. Ameziane, '*Influence of the Counter Ion on the Properties of Poly(o-toluidine) Thin Films and their Schottky Diodes*', Synthetic metals Journal, Vol. 159, N°3-4, pp. 292 – 297, 2009.
- [33] M. Benhayoun, A. Malaoui, M. Ankrim, M.Y. El Azhari, A. Outzourhit, E.L. Amziane and K. Kotb, '*Realization and First Tests of an Impedance Measuring*

- Device in the [1 mHz – 1 MHz] Frequency Interval*, Journal of Physical and Chemical News, Vol. 12, pp. 50 – 56, 2003.
- [34] N. Hadik, A. Malaoui, et al., ‘*A New Technique of Improvement a Dielectric Measurements Use the Statistical Method of Control: Application on Ba_{1-x} Sr_x TiO₃*’, Physical and Chemical News Journal, in press (2009).
- [35] A. Zeroual, M. Ankrim and A.J. Wilkinson. ‘*Stochastic Modelling of Daily Global Solar Radiation Measured in Marrakesh, Morocco*’, Renewable Energy, Vol. 6, N°7, pp. 787 – 793, 1995.