

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Université FERHAT-ABBAS Sétif 1  
Faculté de Technologie  
Département d'Électronique



جامعة فرحات عباس سطيف 1  
كلية التكنولوجيا  
قسم الإلكترونيك

## THÈSE

Présentée au Département d'Électronique

Pour l'obtention du diplôme de

## DOCTORAT

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Électronique

Spécialité : Caractérisation en Électronique

Par

**M<sup>me</sup> TEBBAL Ibtissam**

## THÈME

**CONTRIBUTION À LA  
MODÉLISATION ET À LA  
SIMULATION DES DISPOSITIFS  
PHOTOVOLTAÏQUES PAR  
MÉTHODES ÉVOLUTIONNAIRES**

Soutenue le 24 / 06 / 2024 devant le jury :

M. BOUKEZZOULA Naceur-Eddine	Professeur	Université Ferhat-Abbas Sétif 1	Président
M. FERHAT HAMIDA Abdelhak	Professeur	Université Ferhat-Abbas Sétif 1	Directeur de Thèse
M. ZIET Lahcene	Professeur	Université Ferhat-Abbas Sétif 1	Examineur
M. ZEBIRI Chemseddine	Professeur	Université Ferhat-Abbas Sétif 1	Examineur
M. KHIREDINE Abdelkrim	Professeur	Université de Bejaia	Examineur

# Dédicace

\*\*\*\*\*

À mon père

À ma mère

À mon mari

À mes fils TAYM et BARAA

À mes sœurs et mon frère ZYAD

À mes nièces SARA et RIM et mon neveu ILYAS

# Remerciements

\*\*\*\*\*

Mes remerciements vont tout premièrement à ALLAH tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il ma donné durant toutes ces années d'études.

Je présente mes sincères remerciements en particulier à *M. Abdelhak FERHAT HAMIDA*, professeur à l'université Ferhat Abbas Sétif-1, qui m'a fait l'honneur d'accepter de superviser mon travail, pour l'intérêt et les précieux conseils qu'ils m'ont prodigués tout au long de ce travail et ces encouragement.

Je tiens également à remecier *M. BOUKEZZOULA Naceur-Eddine*, professeur à l'université Ferhat Abbas Sétif-1, qui m'a fait l'honneur de présider le jury.

J'adresse également mes meilleurs sentiment de gratitude aux honorables membres du jury, *MM. ZIET Lahcene* et *ZEBIRI Chemssedine* professeurs à l'université Ferhat Abass Sétif-1 et *M. KHIREDINE Abdelkrim*, professeur à l'université de Béjaia qui ont accepté d'évaluer ce travail.

Les remerciements vont spécialement à *M. Bill Marion*, du Laboratoire NREL, pour avoir fourni les data des modules solaires et à *MM. T. Easwarakhanthan, J. Bottin, I. Bouhouch* et *C. Boutrit* pour avoir rendu publiques leurs data expérimentales.

Finalement, je voudrais exprimer mes plus profondes gratitudes à ma famille et mes amies pour m'avoir apporté le soutien et l'encouragement. Mes plus chaleureux remerciements vont également à tous ceux qui ont contribué par tous les moyens à la réalisation de ce travail.

# Table des Matières

<b>Dédicace</b>	<b>i</b>
<b>Remerciements</b>	<b>ii</b>
<b>Table des Matières</b>	<b>iii</b>
<b>Table des Figures</b>	<b>vii</b>
<b>Liste des Tables</b>	<b>xii</b>
<b>Liste des Symboles et des Abréviations</b>	<b>xiv</b>
<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1 Rappels sur l'Énergie et les Cellules Solaires</b>	<b>4</b>
1.1 Introduction . . . . .	4
1.2 Énergie Solaire . . . . .	7
1.3 Cellules PVs . . . . .	8
1.4 Paramètres Caractéristiques de la Cellule Solaire . . . . .	10
1.4.1 Courant de Court-Circuit . . . . .	11
1.4.2 Tension en Circuit-Ouvert . . . . .	11
1.4.3 Puissance Maximale ( $P_m$ ) . . . . .	11
1.4.4 Facteur de Forme (FF) . . . . .	12
1.4.5 Rendement de Conversion ( $\eta$ ) . . . . .	12

1.4.6	Limites Fondamentales du Rendement [23]	12
1.5	Modèles Électriques d'un Module PV	13
1.5.1	Modèle à Une Diode	14
1.5.2	Modèle à Deux Diodes	15
1.6	Association des Cellules Solaires PV	15
1.6.1	Association Série	15
1.6.2	Association Parallèle	15
1.6.3	Association Hybride	15
1.7	Conclusion	18
<b>2</b>	<b>Extraction des paramètres des dispositifs solaires</b>	<b>19</b>
2.1	Introduction	19
2.2	Méthodes Non-Itératives	21
2.2.1	Méthodes Analytiques	22
2.2.1.1	La Méthode de Picciano :	22
2.2.1.2	La Méthode des cinq Points	23
2.2.2	Méthodes à Base de Calcul de Conductance	25
2.2.3	Méthodes Algébriques	25
2.2.3.1	Méthode de Nehaoua	26
2.2.3.2	Méthode de Chegaar	26
2.2.4	Méthodes à Base de Calcul d'Intégrale	26
2.3	Méthodes Itératives	27
2.3.1	Méthodes à Base de Gradient	28
2.3.2	Extraction par Méthodes Métaheuristiques	29
2.3.2.1	Algorithmes Génétiques (GAs)	29
2.3.2.1.1	Principe des GAs	29
2.3.2.1.2	Opérateurs Crossover	31
2.3.2.2	Évolution Différentielle	32

2.3.2.2.1	Schéma Classique de Base . . . . .	32
2.3.2.2.2	Schémas Adaptés . . . . .	35
2.3.2.3	Particle Swarm Optimization . . . . .	40
2.4	Applications et Commentaires . . . . .	41
2.4.1	Modèle SDM Avec RMSE . . . . .	42
2.4.2	Modèle SDM Avec VOM . . . . .	44
2.4.3	Modèle DDM Avec RMSE . . . . .	46
2.4.4	Données Bruitées . . . . .	46
2.5	Conclusion . . . . .	47
<b>3</b>	<b>Estimation des Paramètres des Cellules Solaires par Algorithmes Génétiques dans un Environnement Bruité</b>	<b>51</b>
3.1	Introduction . . . . .	51
3.2	Formulation du Problème . . . . .	52
3.3	Mise au Points des GAs . . . . .	52
3.3.1	Librairie GA Utilisée . . . . .	53
3.4	Procédure de Calcul . . . . .	53
3.5	Résultats et Discussions . . . . .	54
3.5.1	Courbe Synthétique . . . . .	54
3.5.1.1	Courbe Non-Bruitée . . . . .	54
3.5.1.1.1	L'opérateur UXO . . . . .	55
3.5.1.1.2	L'opérateur AXO . . . . .	57
3.5.1.1.3	L'opérateur BXO . . . . .	57
3.5.1.1.4	Commentaires . . . . .	59
3.5.1.2	Courbes Bruitées . . . . .	60
3.5.1.2.1	Les opérateurs UXO et AXO . . . . .	60
3.5.1.2.2	L'opérateur BXO . . . . .	61
3.5.1.2.3	Fitting des courbes . . . . .	62

3.5.1.2.4	Commentaires . . . . .	63
3.5.2	Données Expérimentales . . . . .	63
3.6	Conclusion . . . . .	65
<b>4</b>	<b>Contribution à la Modélisation des Modules Photovoltaïques</b>	<b>67</b>
4.1	Introduction . . . . .	67
4.2	Estimation des paramètres de quelques courbes sélectionnées . . . . .	69
4.2.1	Module mSi0166 (Cocoa) . . . . .	69
4.2.2	Module xSi11246 (Golden) . . . . .	69
4.2.3	Module xSi12922 (Cocoa) . . . . .	70
4.3	Variation des paramètres des modules PVs en fonction de la température et de l'illumination . . . . .	78
4.3.1	<i>Fitting</i> des courbes . . . . .	80
4.3.2	Module xSi12922 (Cocoa) . . . . .	84
4.3.2.1	Effet de la Température sur le Module xSi12922 (Cocoa) . . . . .	84
4.3.2.2	Effet de l'Illumination sur le Module xSi12922 (Cocoa) . . . . .	88
4.3.2.2.1	Cas de $I_{ph}$ . . . . .	88
4.3.2.2.2	Cas de $I_s$ et de $n$ . . . . .	88
4.3.2.2.3	Cas de $R_s$ . . . . .	89
4.3.2.2.4	Cas de $R_p$ . . . . .	89
4.3.3	Module mSi0166 (Cocoa) . . . . .	94
4.3.3.1	Effet de la Température sur le Module mSi0166 (Cocoa) . . . . .	94
4.3.3.2	Effet de l'illumination sur le Module mSi0166 (Cocoa) . . . . .	98
4.3.3.2.1	Cas de $I_{ph}$ . . . . .	98
4.3.3.2.2	Cas de $I_s$ , $n$ et $R_p$ . . . . .	98
4.3.3.2.3	Cas de $R_s$ . . . . .	98
4.4	Conclusion . . . . .	101

<b>Conclusion Générale</b>	<b>102</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>104</b>



# Table des Figures

1.1	RENDEMENTS DES DIFFÉRENTES CELLULES SOLAIRES AU COURS DES 40 DERNIÈRES ANNÉES (MISE À JOUR PAR LE LABORATOIRE NREL [20]). . . . .	6
1.2	SPECTRES SOLAIRES AM0 ET AM1.5. (DATA NREL [21]) . . . . .	7
1.3	Définition de la Masse d’Air. . . . .	8
1.4	Jonction $pn$ à l’équilibre [22]. . . . .	9
1.5	CARACTÉRISTIQUE IV D’UNE CELLULE SOLAIRE . . . . .	10
1.6	EFFETE DE $R_s$ SUR LA CARACTÉRISTIQUE $I-V$ D’UNE SC. . . . .	13
1.7	EFFETE DE $R_p$ SUR LA CARACTÉRISTIQUE $I-V$ D’UNE SC. . . . .	13
1.8	CIRCUIT EQUIVALENT DU MODÈLE SDM D’UNE SC. . . . .	14
1.9	CIRCUIT EQUIVALENT DU MODÈLE DDM D’UNE SC. . . . .	15
1.10	Cellules identiques en série [24]. . . . .	16
1.11	Cellules identiques en parallèle [24]. . . . .	16
1.12	Caractéristique $I-V$ résultante obtenue en associant en série $N_s$ et en parallèle $N_p$ cellules identiques [28]. . . . .	17
1.13	Cellules identiques en parallèle [29]. . . . .	17
2.1	ORGANIGRAMME DE BASE DES GAS . . . . .	30
2.2	ORGANIGRAMME DE L’ALGORITHME DE . . . . .	33
2.3	COURBE EXPÉRIMENTALE ET COURBES SIMULÉES DE LA SC RTC FRANCE. . . . .	44
2.4	COURBE EXPÉRIMENTALE ET COURBES SIMULÉES DU SP PWP201 . . . . .	45

2.5	IV CARACTÉRISTIQUES DE LA CELLULE SOLAIRE GÉNÉRÉES À PARTIR DES PARAMÈTRES EXTRAITS POUR DIFFÉRENTS NIVEAUX DE BRUIT. LES DONNÉES EXPÉRIMENTALES CORRESPONDENT À UN NIVEAU DE BRUIT DE 0 %.	46
2.6	IV CARACTÉRISTIQUES DE LA CELLULE SOLAIRE GÉNÉRÉES À PARTIR DES PARAMÈTRES EXTRAITS POUR DIFFÉRENTS NIVEAUX DE BRUIT. LES DONNÉES EXPÉRIMENTALES CORRESPONDENT À UN NIVEAU DE BRUIT DE 0 %.	47
3.1	RMSE de la courbe non-bruitée en fonction de $N_{pop}$ pour les trois opérateurs XO	55
3.2	PRÉCISIONS DES PARAMÈTRES SDM ESTIMÉS DE LA SC SYNTHÉTIQUE NON-BRUITÉE EN FONCTION DE $N_{pop}$ POUR L'OPÉRATEUR UXO.	56
3.3	PRÉCISIONS DES PARAMÈTRES SDM ESTIMÉS DE LA SC SYNTHÉTIQUE NON-BRUITÉE EN FONCTION DE $N_{pop}$ POUR L'OPÉRATEUR AXO.	58
3.4	PRÉCISIONS DES PARAMÈTRES SDM ESTIMÉS DE LA SC SYNTHÉTIQUE NON-BRUITÉE EN FONCTION DE $N_{pop}$ POUR L'OPÉRATEUR BXO.	59
3.5	PRÉCISIONS DES PARAMÈTRES SDM ESTIMÉS DE LA SC BRUITÉE EN FONCTION DU NIVEAU DE BRUIT $p$ POUR L'OPÉRATEUR UXO.	61
3.6	PRÉCISIONS DES PARAMÈTRES SDM ESTIMÉS DE LA SC BRUITÉE EN FONCTION DU NIVEAU DE BRUIT $p$ POUR L'OPÉRATEUR AXO.	61
3.7	Précisions des paramètres SDM estimés de la SC bruitée en fonction du niveau de bruit $p$ pour l'opérateur BXO.	62
3.8	COURBES $I-V$ SYNTHÉTIQUES BRUITÉES ET <i>FITTINGS</i> CORRESPONDANTS AVEC LES PARAMÈTRES EXTRAITS À L'AIDE D'UXO AVEC $N_{pop} = 20000$ .	62
3.9	COURBES $I-V$ SYNTHÉTIQUES BRUITÉES ET <i>FITTINGS</i> CORRESPONDANTS AVEC LES PARAMÈTRES EXTRAITS À L'AIDE D'AXO AVEC $N_{pop} = 20000$ .	63
3.10	COURBES $I-V$ SYNTHÉTIQUES BRUITÉES ET <i>FITTINGS</i> CORRESPONDANTS AVEC LES PARAMÈTRES EXTRAITS À L'AIDE D'BXO AVEC $N_{pop} = 20000$ .	63
3.11	Données expérimentales et <i>fittings</i> correspondants de la SC RTC.	65
4.1	Caractéristiques $I-V$ expérimentales (o) et simulées (—) des cinq courbes du module PV mSi0166 au silicium multicristallin installé à Cocoa correspondant à la Table 4.2.	71

4.2	Caractéristiques $I-V$ expérimentales (o) et simulées (—) des cinq courbes du module PV mSi0166 au silicium multicristallin installé à Cocoa correspondant à la Table 4.3. . . . .	73
4.3	Caractéristiques $I-V$ expérimentales (o) et simulées (—) des cinq courbes du module PV xSi11246 au silicium monocristallin installé à Golden correspondant à la Table 4.4. . . . .	75
4.4	Caractéristiques $I-V$ expérimentales (o) et simulées (—) des six courbes du module PV xSi12922 au silicium monocristallin installé à Cocoa correspondant à la Table 4.5. . . . .	77
4.5	RMSE EN FONCTION DE L'ILLUMINATION DU <i>FITTING</i> DES COURBES $I-V$ EXPÉRIMENTALES DU MODULE PV xSi12922 AU SILICIUM MONOCRISTALLIN INSTALLÉ À COCOA. . . . .	83
4.6	RMSE EN FONCTION DE L'ILLUMINATION DU <i>FITTING</i> DES COURBES EXPÉRIMENTALES DU MODULE mSi0166 AU SILICIUM MULTI-CRISTALLIN INSTALLÉ À COCOA. . . . .	83
4.7	Variations des paramètres du module PV xSi12922 au silicium monocristallin installé à Cocoa pour $S = 50 \text{ W/m}^2$ . Valeurs mesurées (o) et <i>fittées</i> (—). . . . .	85
4.8	Variations des paramètres du module PV xSi12922 au silicium monocristallin installé à Cocoa pour $S = 150 \text{ W/m}^2$ . Valeurs mesurées (o) et <i>fittées</i> (—). . . . .	85
4.9	Variations des paramètres du module PV xSi12922 au silicium monocristallin installé à Cocoa pour $S = 200 \text{ W/m}^2$ . Valeurs mesurées (o) et <i>fittées</i> (—). . . . .	86
4.10	Variations des paramètres du module PV xSi12922 au silicium monocristallin installé à Cocoa pour $S = 800 \text{ W/m}^2$ . Valeurs mesurées (o) et <i>fittées</i> (—). . . . .	86
4.11	Variations des paramètres du module PV xSi12922 au silicium monocristallin installé à Cocoa pour $S = 1000 \text{ W/m}^2$ . Valeurs mesurées (o) et <i>fittées</i> (—). . . . .	87
4.12	Variations des paramètres du module PV xSi12922 au silicium monocristallin installé à Cocoa pour $S = 1300 \text{ W/m}^2$ . Valeurs mesurées (o) et <i>fittées</i> (—). . . . .	87
4.13	Variations du paramètre $I_{ph}$ du module PV xSi12922 (Cocoa) en fonction de $S$ pour $T = 10 - 60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Valeurs mesurées (o) et <i>fittées</i> (—). . . . .	89
4.14	Variations du paramètre $I_s$ du module PV xSi12922 (Cocoa) en fonction de $S$ pour $T = 10 - 60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Valeurs mesurées (o) et <i>fittées</i> (—). . . . .	90
4.15	Variations du paramètre $n$ du module PV xSi12922 (Cocoa) en fonction de $S$ pour $T = 10 - 60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Valeurs mesurées (o) et <i>fittées</i> (—). . . . .	90

4.16	Variations du paramètre $R_s$ du module PV xSi12922 (Cocoa) en fonction de $S$ pour $T = 10 - 60$ °C. Valeurs mesurées (o) et <i>fittées</i> (—).	91
4.17	Variations du paramètre $R_p$ du module PV xSi12922 (Cocoa) en fonction de $S$ pour $T = 10 - 60$ °C. Valeurs mesurées (o) et <i>fittées</i> (—).	91
4.18	Variations du paramètre $I_s$ du module PV xSi12922 (Cocoa) en fonction de $S$ pour $T = 10 - 35$ °C. Valeurs mesurées (o) et <i>fittées</i> (—).	92
4.19	Variations du paramètre $I_s$ du module PV xSi12922 (Cocoa) en fonction de $S$ pour $T = 35 - 60$ °C. Valeurs mesurées (o) et <i>fittées</i> (—).	92
4.20	Variations du paramètre $n$ du module PV xSi12922 (Cocoa) en fonction de $S$ pour $T = 10 - 35$ °C. Valeurs mesurées (o) et <i>fittées</i> (—).	93
4.21	Variations du paramètre $n$ du module PV xSi12922 (Cocoa) en fonction de $S$ pour $T = 35 - 60$ °C. Valeurs mesurées (o) et <i>fittées</i> (—).	93
4.22	Variations des paramètres du module PV mSi0166 au silicium multicristallin installé à Cocoa pour $S = 50$ W/m <sup>2</sup> .	95
4.23	Variations des paramètres du module PV mSi0166 au silicium multicristallin installé à Cocoa pour $S = 450$ W/m <sup>2</sup> .	95
4.24	Variations des paramètres du module PV mSi0166 au silicium multicristallin installé à Cocoa pour $S = 500$ W/m <sup>2</sup> .	96
4.25	Variations des paramètres du module PV mSi0166 au silicium multicristallin installé à Cocoa pour $S = 800$ W/m <sup>2</sup> .	96
4.26	Variations des paramètres du module PV mSi0166 au silicium multicristallin installé à Cocoa pour $S = 1000$ W/m <sup>2</sup> .	97
4.27	Variations des paramètres du module PV mSi0166 au silicium multicristallin installé à Cocoa pour $S = 1300$ W/m <sup>2</sup> .	97
4.28	Variations du paramètre $I_{ph}$ du module PV mSi0166 (Cocoa) en fonction de $S$ pour $T = 10 - 60$ °C. Valeurs mesurées (o) et <i>fittées</i> (—).	99
4.29	Variations des paramètres $I_s$ et $n$ du module PV mSi0166 (Cocoa) en fonction de $S$ pour $T = 10 - 60$ °C. Valeurs mesurées (o) et <i>fittées</i> (—).	99
4.30	Variations du paramètre $R_p$ du module PV mSi0166 (Cocoa) en fonction de $S$ pour $T = 10 - 60$ °C. Valeurs mesurées (o) et <i>fittées</i> (—).	100

4.31 Variations du paramètre  $R_s$  du module PV mSi0166 (Cocoa) en fonction de  $S$   
pour  $T = 10 - 60$  °C. Valeurs mesurées (o) et *fittées* (—). . . . . 100

## Liste des Tables

2.1	Structure de la mémoire des succès et de la mémoire des échecs [84] . . . . .	36
2.2	Structure de la mémoire de l'historique $M_{CR}, M_F$ [100] . . . . .	40
2.3	Paramètres SDM de la SC RTC et du SP PWP201 extraits par différentes méthodes en minimisant le RMSE . . . . .	43
2.4	Paramètres SDM de la SC RTC et du SP PWP201 extraits par différentes méthodes en minimisant le $S_f$ . . . . .	49
2.5	Paramètres DDM de la SC RTC extraits par différentes méthodes en minimisant le RMSE . . . . .	50
3.1	Valeurs exactes et intervalles de recherche des paramètres utilisés dans les GAs	54
3.2	PARAMÈTRES DES COURBES NON-BRUITÉES ESTIMÉS EN UTILISANT UXO . . . . .	56
3.3	PARAMÈTRES DES COURBES NON-BRUITÉES ESTIMÉS EN UTILISANT AXO . . . . .	58
3.4	PARAMÈTRES DES COURBES NON-BRUITÉES ESTIMÉS EN UTILISANT BXO . . . . .	59
3.5	Paramètres de la SC RTC extraits par différentes méthodes . . . . .	64
4.1	Spécifications des modules PVs considérés dans ce travail (dans les conditions STC). . . . .	68
4.2	Paramètres des cinq courbes considérées par Y. Zhang <i>et al.</i> [29] du module PV mSi0166 (Cocoa) au silicium multicristallin extraits par différentes méthodes . . . . .	70
4.3	Paramètres électriques et puissance maximale des cinq courbes considérées par C. Zhang <i>et al.</i> [126] du module PV mSi0166 (Cocoa) au silicium multicristallin extraits par différentes méthodes . . . . .	72

4.4	Paramètres électriques et puissance maximale des cinq courbes considérées par C. Zhang <i>et al.</i> du module PV xSi11246 (Golden) au silicium monocristallin extraits par différentes méthodes . . . . .	74
4.5	Paramètres des six courbes considérées par Ortiz-Conde <i>et al.</i> [104] du module PV xSi12922 (Cocoa) au silicium monocristallin extraits par différentes méthodes	76
4.6	Les différents types de variation des paramètres SDM des modules PVs en fonction de $T$ et de $S$ (d'après Fébba <i>et al.</i> [132]). . . . .	79
4.7	Comparaison des différentes métriques obtenues sur les modules PVs xSi12922 (Cocoa) et mSi0166 (Cocoa) avec des résultats publiés. . . . .	82

## Liste des Symboles et des Abréviations

		$R_{sh}$	Résistance shunt. 10
$E_g$	Largeur de la Bande Interdite. 8, 13	$R_s$	Résistance série. 10, 12–14, 20–22, 25, 26, 45, 47, 51, 54–57, 59, 62, 69, 72, 73, 82, 87, 92, 99, 101
$FF$	Facteur de Forme. 1, 19	$V_m$	Tension au MPP. 1, 2, 11, 19, 20, 22, 23, 46
$G_p$	Conductance parallèle. 10, 12, 14, 20–22, 25, 26, 45, 51, 54–57, 59, 62, 69, 73	$V_{oc}$	Tension de circuit ouvert. 1, 2, 11, 12, 19, 20, 22, 23, 27
$I_m$	Courant au MPP. 1, 2, 11, 19, 20, 22, 23, 46, 60	$V_{th}$	Tension thermique. 20
$I_{ph}$	Photocourant. 11, 12, 14, 20–22, 25, 26, 45, 47, 51, 54–57, 59, 62, 69, 73, 82, 86, 87, 92, 96, 99	$I-V$	Courant-Tension. 1, 2, 10–16, 19–23, 26, 27, 46, 52, 61, 62, 64, 66, 68, 71, 73, 75, 76, 81
$I_{sc}$	Courant de court-circuit. 1, 2, 11, 12, 19–23, 25, 26, 60	$\Delta$	Erreur Absolue du Paramètre. 53, 57
$I_s$	Courant de Saturation. 11, 12, 14, 20–22, 25–27, 45, 51, 54–57, 59, 62, 69, 73, 76, 82, 86, 92, 96, 99	$\Delta_B$	Erreur Relative du Paramètre. 53, 54, 56–58
$N_{pop}$	Population Size. 29, 52–59, 61–65	$\eta$	Rendement. 1, 12, 19
$P$	$(I_{ph}, I_s, n, R_s, G_p)$ . 51, 52	$\overline{MAE}$	Average Mean Absolute Error. 78–80
$P_m$	Puissance maximale. 1, 11, 19, 20	$\overline{NRMSE}$	Average Normalised Root Mean Square Error. 78–80
$R_{p0}$	$\left. \frac{dV}{dI} \right _{V_{oc}}$ . 22, 23	$\overline{RMSE}$	Average Root Mean Square Error. 78–80
$R_p$	Résistance parallèle. 10, 12–14, 22, 82, 87, 92, 96	$\overline{TRMSE}$	Total Root Mean Square Error. 78–
$R_{s0}$	$\left. \frac{dV}{dI} \right _{I_{sc}}$ . 22, 23		



	80	<b>EA</b>	Evolutionary Algorithm. 20, 29, 32, 64, 65
$n$	Facteur d'idéalité. 14, 20–22, 25, 26, 45, 47, 51, 54–57, 59, 63, 69, 73, 82, 86, 87, 92, 96	<b>GA</b>	Genetic Algorithm. 3, 29–31, 42, 47, 51–54, 57–59, 61–65, 67, 78, 99–101
$p$	Noise Level. 52, 59–61, 64	<b>GGHS</b>	Grouping-Based Global Harmony Search. 61
$p_{cros}$	Probabilité de Croisement. 30, 51	<b>GR</b>	Génération-Recombinaison. 1
$p_{mut}$	Probabilité de Mutation. 30, 51	<b>IGHS</b>	Innovative Global Harmony Search. 61
<b>ABCO</b>	Artificial Bee Colony Optimization. 29	<b>ITEWRC</b>	Improved Transformation Equations Without Reference condition. 79, 80
<b>ACO</b>	Ant Colony Optimization. 29	<b>JADE</b>	Adaptative Differential Evolution (Zhang et Sanderson [99]). 37, 39, 40, 42, 43, 45
<b>AXO</b>	Arithmetic Crossover Operator. 31, 51, 53, 54, 56–60, 62, 64, 65, 100, 101	<b>jDE</b>	Adaptative Differential Evolution (J. Brest <i>et al.</i> [97]). 37, 42, 43, 45, 46, 50, 61
<b>BCGA</b>	Binary-Coded GAs. 31	<b>LOM</b>	Méthode d'Optimisation Latérale. 28, 42
<b>BHCS</b>	Biogeo-graph-based Heterogeneous Cuckoo Search algorithm. 50	<b>MAE</b>	Mean Absolute Error. 78, 79
<b>BXO</b>	Blend Crossover Operator. 31, 32, 42, 51, 53, 54, 57–65, 100, 101	<b>MOA</b>	Metaheuristic Optimization Algorithm. 2, 3, 20
<b>cSGA</b>	GAs implantés en C++ [108]. 42, 43, 45, 46	<b>MPP</b>	Maximum Power Point. 1, 19
<b>DD</b>	Drift-Diffusion. 1	<b>mSGA</b>	GAs implantés en Matlab (GAOT). 42, 43, 45, 46
<b>DDM</b>	Double Diode Model. 1, 14, 15, 17, 41, 45, 49, 99, 101	<b>NREL</b>	National Renewable Energy Laboratory. 3, 66, 99, 101
<b>DE</b>	Differential Evolution. 29, 32–35, 42, 43, 45–47, 100		
<b>DEDCF</b>	Differential Evolution with Dynamic Control Factors. 42, 45, 62–64		

<b>NRMSE</b>	Normalised Root Mean Square Error. 78, 79	46, 48, 50, 51, 55, 56, 58, 60, 61, 64, 67–72, 76–78, 80, 82, 86, 92, 96, 99, 101
<b>OF</b>	Objective Function. 51, 65	
<b>PGJAYA</b>	Performance Guided JAYA algorithm. 50, 62	
<b>PSO</b>	Particle Swarm Optimization (Zhang et Sanderson [99]). 29, 40–43, 45, 47, 100	
<b>PV</b>	Photovoltaïque. 1, 4, 5, 8, 9, 11–17, 19, 47, 66–98, 100	
<b>RCGA</b>	Real-Coded GAs. 31, 51, 100	
<b>RMSE</b>	Root Mean Square Error. 28, 42, 43, 45, 46, 49, 51–57, 62, 64, 67–69, 71, 72, 78, 79, 100, 101	
<b>SaDE</b>	Self-Adaptive Differential Evolution(Qin [84]). 35, 42, 43, 45, 46	
<b>SATLBO</b>	Self-Adaptive Teaching-Learning-Based Optimization algorithm. 50, 61	
<b>SBX</b>	Simulated Binary Crossover. 31	
<b>SC</b>	Solar Cell. 1–3, 5, 9–11, 13–15, 19–21, 23, 25–27, 41–46, 48–53, 55–58, 60–65, 69	
<b>SD</b>	Significant Digit. 54, 55, 57, 64	
<b>SDM</b>	Single Diode Model. 1–3, 14, 17, 19, 20, 22, 23, 25, 28, 41–43, 45,	
		<b>SHADE</b> Success-History Based Parameter Adaptation for Differential Evolution ([100]). 39, 40, 42, 43, 45, 46
		<b>SI</b> Swarm Intelligence. 29, 40
		<b>SNLLS</b> Separable Nonlinear Least Squares Search. 79, 80
		<b>SP</b> Solar Pannel. 1, 3, 5, 14, 19, 41–46, 48, 50, 99, 101
		<b>STC</b> Standard Test Condition. 1, 19, 67
		<b>SUS</b> Stochastic Universal Selection. 36
		<b>TDM</b> Triple Diode Model. 1, 99, 101
		<b>TSLLS</b> Two-Step Linear Least-Squares. 79, 80
		<b>TSLLSwR</b> Two-Step Linear Least-Squares with Refinement. 79, 80
		<b>UXO</b> Uniform Crossover Operator. 31, 51, 53–62, 64, 65, 100, 101
		<b>VOM</b> Méthode d’Optimisation Verticale. 28, 42, 45, 100
		<b>XO</b> Crossover Operator. 30, 31, 51–54, 57, 59, 60, 64, 65
		<b>ZCE</b> Zone de Charge d’espace. 8, 9

# Introduction

\*\*\*\*\*

Le photovoltaïque (PV) est de nos jours la technologie de production d'électricité à croissance la plus rapide dans le monde [1]. La capacité mondiale installée a considérablement augmenté au cours des dernières décennies en atteignant respectivement 544 MW, 40 GW et 760 GW dans les années 2000, 2010 et 2020, soit un taux de croissance annuel moyen de 36 % [1–3]. Cette tendance se maintiendra au cours de la prochaine décennie, principalement en raison de la réduction des coûts des dispositifs et des systèmes photovoltaïques.

Les systèmes photovoltaïques sont conçus autour de cellules (SCs) et de panneaux solaires (SPs) dont les fabricants tabulent les paramètres de performances dans les conditions de test standard (*Standard Test Condition* : STC), correspondant à une insolation de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Les principaux paramètres sont le courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ), la tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ), le point de puissance maximale (MPP)  $P_m$ , le courant  $I_m$  et la tension  $V_m$  au MPP, le rendement  $\eta$  et le facteur de forme  $FF$ , en plus des coefficients de température des ces paramètres. Étant donné que tous les systèmes PV doivent souvent fonctionner au MPP loin de STC, les concepteurs doivent connaître les performances dans diverses conditions de fonctionnement. De plus, ils doivent estimer ces valeurs à partir de modèles mathématiques décrivant les caractéristiques de *courant-tension* ( $I-V$ ).

Les principaux modèles mathématiques qui décrivent et prédisent les caractéristiques  $I-V$  des cellules solaires sont le modèle à une diode (SDM) et le modèle à deux diodes (DDM). Le premier décrit principalement le courant de *dérive-diffusion* en négligeant tous les autres phénomènes de transport [4]. Il est le plus utilisé dû à sa simplicité et à sa précision acceptable. Le modèle DDM incorpore en plus du courant DD, le courant de *génération-recombinaison* (GR) qui devient important pour des intensités d'insolation réduite et à des températures basses. Il existe un autre modèle que les chercheurs utilisent parfois, c'est le modèle à trois diodes (TDM).

Il prend en compte en plus des phénomènes de bord.

Les trois modèles existants sont définis par des équations mathématiques non-linéaires implicites. Cette nature rend la détermination des paramètres de ces équations une tâche difficile. Depuis les années 60, plusieurs centaines de méthodes ont été proposées à cette fin, cependant aucune n'est totalement satisfaisante. La proposition de nouvelle méthode est toujours la bienvenue. Les méthodes proposées peuvent être classées en deux groupes :

- Les méthodes non-itératives opèrent souvent dans des régions spécifiques des courbes  $I-V$  et nécessitent une connaissance préalable de certains points caractéristiques, tels que  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_m$  et  $V_m$  [5]. Elles ont été proposées pour la plupart avant l'année 2000.
- Les méthodes itératives (numériques) sont basées sur des algorithmes d'optimisation déterministes ou métaheuristiques (MOA) qui opèrent sur toute la courbe et ne nécessitent aucun point spécifique. Les algorithmes déterministes ont l'avantage d'être très rapides. Cependant, ils ont les inconvénients majeurs d'être basés sur des conditions initiales, de nécessiter des calculs de dérivées et de ne pas garantir une solution globale. Ces inconvénients peuvent être surmontés par les MOA [6], où les algorithmes évolutionnaires (EA) constituent une sous-classe très importante. Par conséquent, ils sont de plus en plus utilisés dans l'estimation des paramètres des SCs. Par exemple, Abbassi *et al.* ont revu près d'une centaine publiée uniquement depuis 2008 [7]).

D'autres part, le bruit, qui est un phénomène très important dans tous les systèmes électroniques, n'a été que rarement pris en considération dans les méthodes proposées [5, 8–13]. Seuls Maouhoub *et al.* [11] et Fébba *et al.* [5] ont étudié de façon approfondie l'effet du bruit sur les méthodes qu'ils proposent.

Un dernier point et non des moindres à souligner est que les méthodes proposées s'intéressent plus au *fitting* des courbes qu'à la précision des paramètres, c'est à dire à l'ajustement des courbes expérimentales aux courbes prédites. Pour cette raison, on peut trouver des méthodes qui peuvent donner des paramètres de valeurs très différentes tout en générant de très bons  *fittings*.

Dans ce travail, il s'agit de proposer des méthodes évolutionnaires à la fois robuste au bruit et générant des paramètres de bonne précision. Ces méthodes seront utilisées pour extraire les paramètres SDM de données expérimentales et pour étudier les variations des paramètres en fonction de la température et de l'illumination.

La thèse est scindée en quatre chapitres :

- Dans le premier, on rappelle brièvement les notions de base du photovoltaïque. On y traite l'effet photo-électrique, le spectre solaire et les caractéristiques des SCs et des

SPs.

- Dans le deuxième, on trouve une revue des principales méthodes d'extraction des paramètres qu'on trouve dans la littérature. Les méthodes itératives et non-itératives y sont exposées. La supériorité des MOA sera établie à travers l'application à une SC et à un SP.
- Le troisième chapitre est une étude de l'effet de l'opérateur de croisement sur les algorithmes génétiques (GAs) appliqués à l'extraction des paramètres électriques des cellules solaires. L'étude est réalisée en trois étapes :
  - Dans la première, on étudie la précision des paramètres en appliquant les GAs à une courbe synthétique non-bruitée.
  - Dans la deuxième, on étudie la robustesse au bruit en appliquant les GAs à des courbes bruitées.
  - Dans la dernière, on valide les résultats en utilisant une courbe expérimentale [14]\* et en comparant les résultats obtenus avec les travaux publiés.
- Dans le dernier on fait une étude qualitative de l'effet de la température et de l'illumination sur les paramètres SDM de deux modules de la base de données que le laboratoire NREL met à la disposition des chercheurs [15]†.

---

\*. Nous tenons à remercier MM. T. Easwarakhanthan, J. Bottin, I. Bouhouch et C. Boutrit pour avoir rendu publiques leurs data expérimentales [14].

†. Nous tenons à remercier Bill Marion [15], du Laboratoire NREL, pour avoir fourni les data des modules solaires.

# Rappels sur l'Énergie et les Cellules Solaires

\*\*\*\*\*

---

1.1	Introduction . . . . .	4
1.2	Énergie Solaire . . . . .	7
1.3	Cellules PVs . . . . .	8
1.4	Paramètres Caractéristiques de la Cellule Solaire . . . . .	10
1.5	Modèles Électriques d'un Module PV . . . . .	13
1.6	Association des Cellules Solaires PV . . . . .	15
1.7	Conclusion . . . . .	18

---

## 1.1 Introduction

L'énergie **PV** est l'énergie électrique produite par des panneaux ou des centrales **PVs** à partir du rayonnement solaire. Elle est dite renouvelable, car sa source (le soleil) est considérée comme inépuisable à l'échelle du temps humain. Elle apporte une solution alternative aux énergies fossiles conventionnelles. Elle est propre, à faible coût et respectueuse de l'environnement.

La cellule **PV** est le composant électronique de base de la conversion **PV**. Elle utilise l'effet photoélectrique pour convertir les ondes électromagnétiques (rayonnement) émises par le soleil en électricité. C'est un phénomène dans lequel un matériau, généralement métallique, exposé à un rayonnement électromagnétique de fréquence suffisamment élevé (supérieur à un seuil dépendant du matériau) émet des électrons. Dans un semiconducteur, des paires d'électrons-trous sont ainsi générées créant un courant ou une tension électrique. Ce phénomène a été mis en évidence par Alexandre Edmond Becquerel en 1839 et expliqué par Einstein en 1905 [16]. L'explication adéquate se fait par la théorie quantique qui considère que la lumière est constituée d'énergies discrètes appelées photons. L'énergie de chaque photon,  $E_{ph}$ , est reliée à la fréquence  $\nu$  ( $= c/\lambda$ )

et la constante de Planck  $h$  par l'équation 1-1.  $c$  est la célérité de la lumière et  $\lambda$  est la longueur d'onde du photon.

$$E_{ph} = h\nu = h\frac{c}{\lambda} \quad [1 - 1] \triangleleft$$

La première cellule **PV** à haute puissance a été développée en 1954 au laboratoires *Bell* (États-Unis) par *Chapin, Fuller et Pearson* [17] qui avaient découvert que le dopage pouvait faire augmenter la photosensibilité du silicium. Ils fabriquèrent la première cellule solaire au silicium, d'un rendement de 6%. Dès lors, les recherches s'intensifièrent pour augmenter le rendement des cellules et ce aussi bien dans les matériaux utilisés que dans les méthodes d'élaboration. Les progrès rencontrés au cours des 40 dernières années dans la réalisation des cellules solaires sont représentés dans la figure 1.1.

Les grandes stations historiques qui ont menés vers l'utilisation des systèmes **PVs** peuvent être résumé comme suit [18, 19] :

**1839** : *Edmond Becquerel* découvre le phénomène **PV**.

**1875** : *Werner Von Siemens* reconnaît à l'Académie des Sciences de Berlin l'importance des **PVs**.

**1883** : *Charles Fritts* invente les premiers **SPs** avec des **SCs** à base de sélénium.

**1888** : *Edward Weston* reçoit le premier brevet américain d'une **SC**.

**1901** : *Nikola Tesla* reçoit le premier brevet américain d'un **SP**.

**1905** : *Albert Einstein* explique l'effet photoélectrique.

**1954** : *Chapin, Fuller et Pearson* mettent au point la première **SC** à haute puissance à base de silicium [17].

**1963** : *Sharp Corporation* produit un **SPs** au silicium marquant le début de la production en masse des **SPs**.

**1964** : *Nasa* lance le premier satellite *Nimbus* doté d'un générateur photovoltaïque de 470 W.

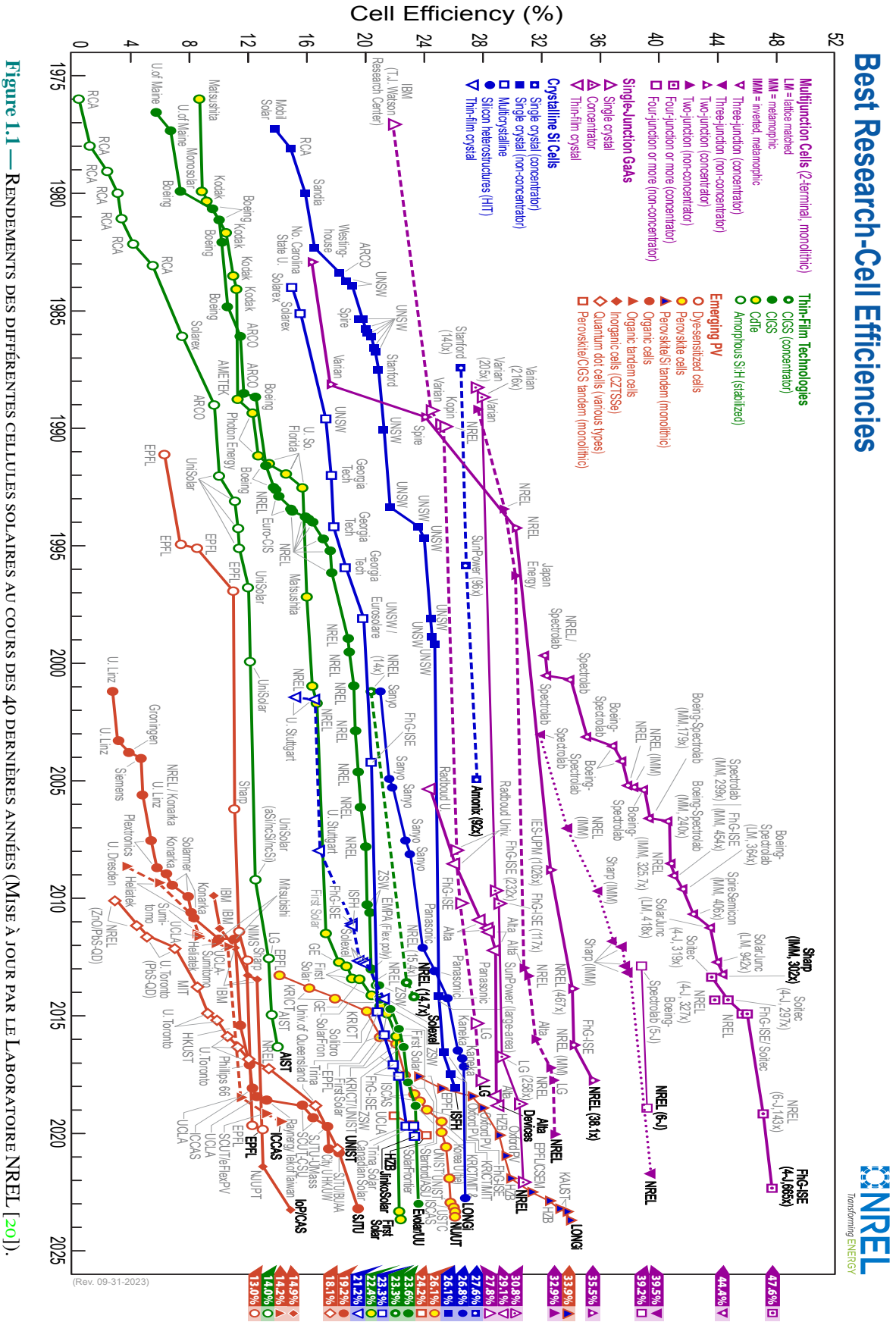
**1973** : *Delaware University* construit la première maison alimentée par des **SPs**.

**1976** : *Kyocera* commence la production des **SPs** à couches minces au silicium.

**1976** : *National Renewable Energy Laboratories (NREL)* est créé.

**1983** : La première voiture alimentée par énergie **PV** parcourt une distance de 4000 km en Australie.

Le chapitre donne un rappel sur les **SCs** et les **SPs**, et sur les modèles électriques utilisés pour prédire leurs caractéristiques courant-tension.





## 1.2 Énergie Solaire

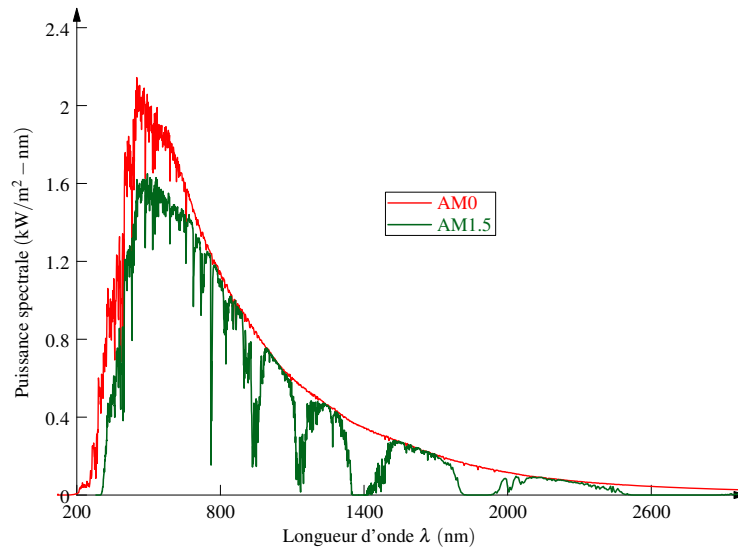


Figure 1.2 — SPECTRES SOLAIRES AM0 ET AM1.5. (DATA NREL [21])

Le rayonnement électromagnétique solaire est émis dans la bande des longueurs d'onde 0.22 à 10  $\mu\text{m}$ , comme illustré par la figure 1.2. L'énergie associée se décompose approximativement ainsi :

- 9% dans la bande ultraviolet ( $< 0,4\mu\text{m}$ )
- 47% dans la bande visible ( $0,4$  à  $0,8\mu\text{m}$ )
- 44% dans la bande des infrarouges ( $> 0,8\mu\text{m}$ ).

L'énergie correspondant à ce rayonnement atteint l'atmosphère terrestre à une moyenne de  $1367 \text{ W/m}^2 \pm 3\%$ , selon que la position du soleil dans sa rotation autour de la terre. L'atmosphère en absorbe une partie et la quantité d'énergie qui atteint la surface de la terre dépasse rarement  $1200 \text{ W/m}^2$ . Cette dernière est caractérisée par le nombre de masse d'air ( $AM$ ) qui est le rapport entre l'épaisseur d'atmosphère traversée par le rayonnement solaire direct pour atteindre le sol et l'épaisseur traversée à la verticale du lieu lorsque le soleil est au zénith. À l'aide des points  $O$ ,  $A$  et  $M$  et l'angle  $\theta$  représentés sur la figure 1.3, on déduit la valeur de la masse d'air  $AM$

$$AM = \frac{OM}{OA} = \frac{1}{\sin(\theta)} \quad [1 - 2] \triangleleft$$

Selon la valeur de  $\theta$ , on distingue :

- **AM1** : Le soleil au zénith.
- **AM2** : Le soleil à  $30^\circ$ .

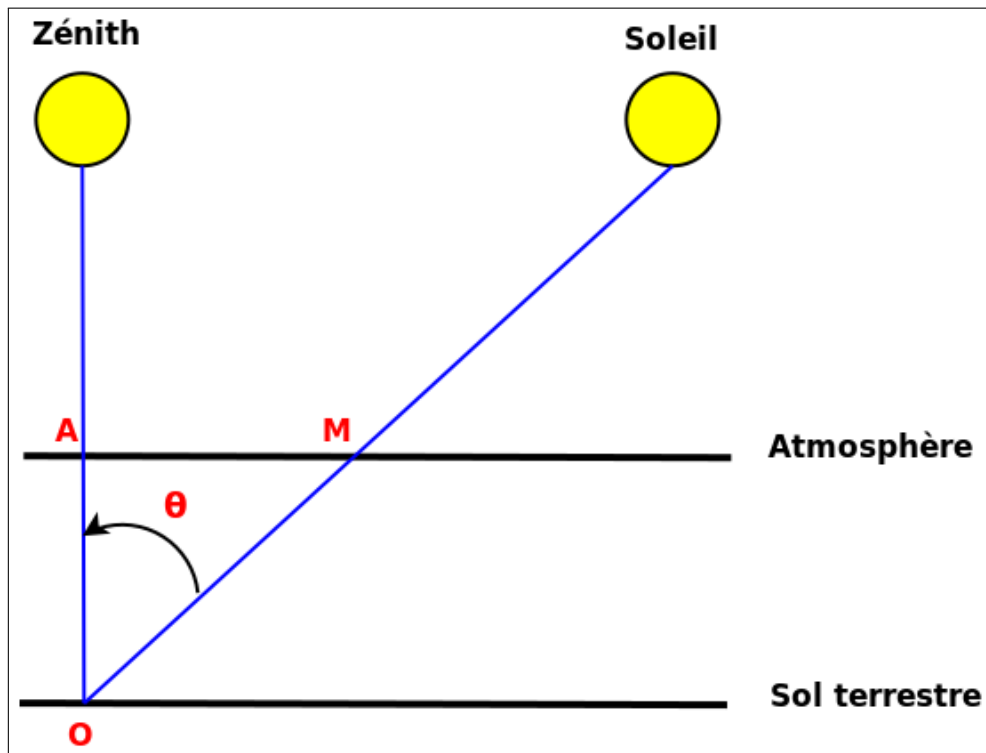


Figure 1.3 — Définition de la Masse d'Air.

- **AM1.5** : Le soleil est à  $48^\circ$ .
- **AM0** : Le soleil est hors atmosphère (par convention).

### 1.3 Cellules PVs

La cellule **PV** convertit l'énergie solaire en énergie électrique. C'est une jonction *pn* constituée par deux régions neutres dopées de façon opposées (*p* et *n*) et séparées par une zone dépourvue de charges libres (la zone de charge d'espace (**ZCE**) ou de déplétion) s'étendant de la jonction à  $x = W_p$  dans le matériau dopé *p* et jusqu'à  $x = W_n$  dans la région dopée *n* comme montrée par la figure 1.4. La **ZCE** a été formée par la migration et la recombinaison des porteurs majoritaires (électrons et trous) de part et d'autre de la jonction. Ainsi, les ions dopants n'ont plus leurs charges électriques compensées par les porteurs libres et par conséquent un champ électrique se crée et s'oppose à la migration des porteurs.

L'exposition de la jonction au rayonnement solaire va créer, par le phénomène de génération, un excès de charges électriques (électrons et trous) qui vont être dirigées vers les contacts métalliques par le champ électrique interne dans des directions opposées (ce qui est appelé séparation de charges). Ceci crée un courant électrique appelé photo-courant dont l'intensité dépend essentiellement de la largeur de la bande interdite ( $E_g$ ) du semiconducteur.

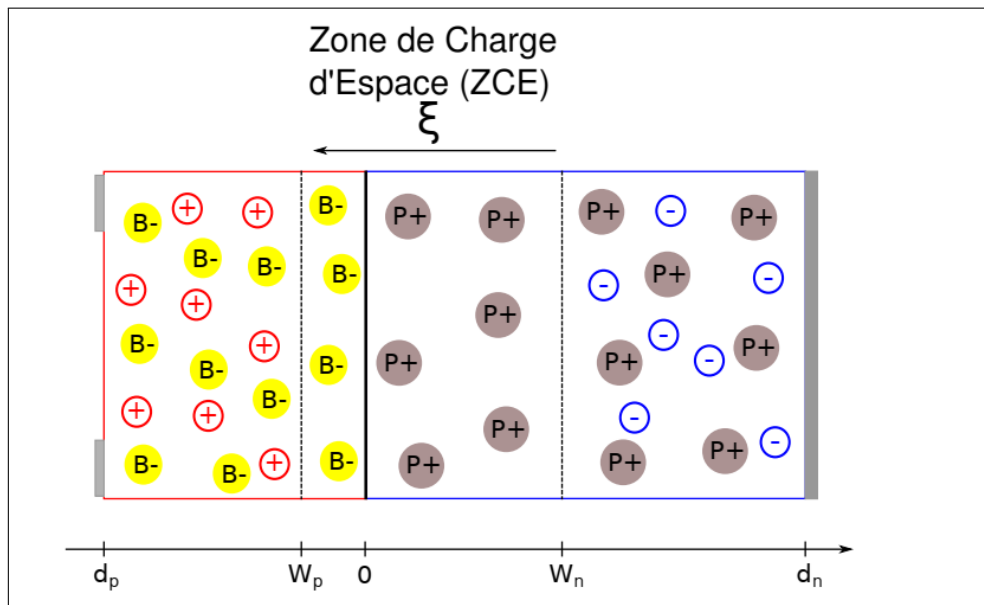


Figure 1.4 — Jonction pn à l'équilibre [22].

Le courant électrique qui traverse la SC sera la superposition de 4 composantes fondamentales :

- le courant de dérive dû au champ électrique,
- le courant de diffusion dû aux gradients des concentrations des charges électriques,
- le courant de génération dû à l'énergie PV
- et le courant de recombinaison dû à l'excès de charges dans la ZCE.

Ces courants sont régis par les équations fondamentales qui gouvernent le transport des charges dans les semiconducteurs [4] :

**L'équation de Poisson :**

$$\frac{d^2V}{dx^2} = -\frac{d\mathcal{E}}{dx} = \frac{\rho(x)}{\epsilon_s} \tag{1-3}$$

où  $V$  est le potentiel électrique,  $\epsilon_s$  est la permittivité diélectrique du matériau,  $\mathcal{E}$  est le champ électrique et est  $\rho(x)$  est la densité de charge électrique.

**Les équations du courant :**

$$J_p = q\mu_p p_n \mathcal{E} - qD_p \frac{dp_n}{dx} \tag{1-4}$$

$$J_n = q\mu_n n_p \mathcal{E} - qD_n \frac{dn_p}{dx} \tag{1-5}$$

où  $n_p$  ( $p_n$ ),  $J_n$  ( $J_p$ ),  $\mu_n$  ( $\mu_p$ ) et  $D_n$  ( $D_p$ ) sont respectivement la densité, le courant, la mobilité et le coefficient de diffusion des électrons (trous).

Les équations du continuité :

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_p}{dx} - G_p + \frac{(p_n - p_{n0})}{\tau_p} = 0 \quad [1-6] \triangleleft$$

$$\frac{1}{q} \frac{dJ_n}{dx} - G_n + \frac{(n_p - n_{p0})}{\tau_n} = 0 \quad [1-7] \triangleleft$$

où  $G_n$  et  $G_p$  sont les taux de génération des porteurs minoritaires et  $\tau_n$  et  $\tau_p$  leurs durées de vie.  $n_{p0}$  et  $p_{n0}$  sont respectivement les densités d'équilibre des électrons et des trous.

**Le courant total :** C'est la somme des courants des électrons et des trous :

$$J_T = J_n + J_p. \quad [1-8] \triangleleft$$

## 1.4 Paramètres Caractéristiques de la Cellule Solaire

La figure 1.5 représente la caractéristique  $I-V$  d'une SC. Elle est influencée en générale par la présence d'une résistance série ( $R_s$ ) et d'une résistance parallèle ( $R_p$ ) (ou shunt). Ces résistances ont pour origine [4, 16, 23, 24] :

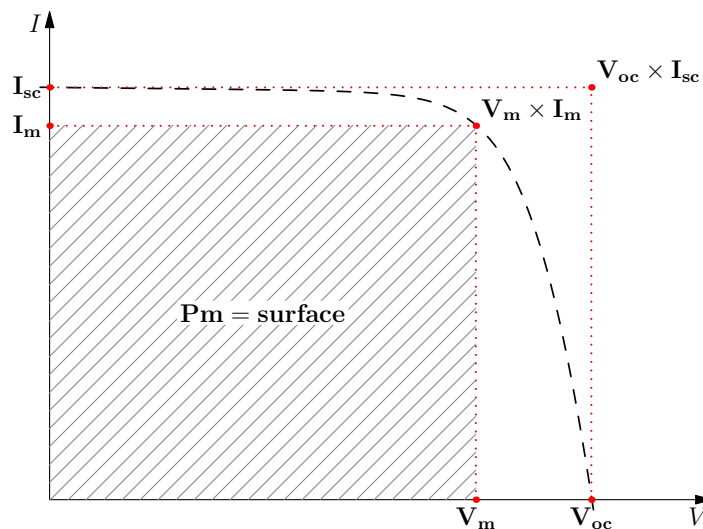


Figure 1.5 — CARACTÉRISTIQUE IV D'UNE CELLULE SOLAIRE

- La résistance série  $R_s$  : est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de leurs résistivités ;
- La résistance parallèle (shunt)  $R_p$  ( $R_{sh}$ ), ou la conductance parallèle  $G_p$  ( $= 1/R_p$ ) : est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci

a été réalisée.

Dans le cas idéal, la relation courant-tension dans une **SC** est donnée par la relation :

$$I_d(V) = I_{ph} - I_s \left( \exp \left( \frac{qV}{k_B T} \right) - 1 \right) \quad [1 - 9] \triangleleft$$

où  $I_s$  : Courant de saturation de la diode,  $q$  : charge électronique,  $k_B$  : Constante de Boltzmann et  $T$  la température. Les points caractéristiques de la **SC** sont alors définis comme suit :

#### 1.4.1 Courant de Court-Circuit

Le courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ) correspond à une tension nulle et de ce fait la puissance délivrée par la cellule est nulle. C'est l'intersection de la courbe  $I-V$  avec l'axe  $I$ . Il est directement proportionnel à l'intensité de la lumière et aux dimensions de la cellule [23]. Dans le cas idéal, il est égal à  $I_{ph}$  [4] :

$$I_{sc} = I_{ph} \quad [1 - 10] \triangleleft$$

#### 1.4.2 Tension en Circuit-Ouvert

La tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) correspond à un courant nul et de ce fait la puissance délivrée par la cellule est nulle. C'est l'intersection de la courbe  $I-V$  avec l'axe  $V$ . Il ne dépend pas des dimensions et reste constant avec le changement de l'intensité de la lumière. Dans le cas idéal,  $V_{oc}$  est donnée par la relation [23] :

$$V_{oc} = \frac{k_B T}{q} \log \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad [1 - 11] \triangleleft$$

#### 1.4.3 Puissance Maximale ( $P_m$ )

La puissance fournie par une cellule **PV** sous éclairage dépend de la résistance de charge placée aux bornes de la cellule. Elle atteint sa valeur maximale en un point  $P_m$  de coordonnées ( $I_m, V_m$ ) de la courbe  $I-V$  (courants compris entre 0 et  $I_{sc}$  et tension comprise entre 0 et  $V_{oc}$ ) [23] :

$$P_m = V_m I_m \quad [1 - 12] \triangleleft$$

#### 1.4.4 Facteur de Forme (FF)

Le nom Facteur de Forme (*Fill Factor*) dérive de la représentation graphique. Il est défini par la relation suivante [23] :

$$FF = \frac{P_m}{V_{oc} I_{sc}} = \frac{V_m I_m}{V_{oc} I_{sc}} \quad [1 - 13] \triangleleft$$

### 1.4.5 Rendement de Conversion ( $\eta$ )

Le rendement de conversion ( $\eta$ ) des cellules PVs est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente  $P_{in}$  [23].

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} = \frac{FFV_{oc}I_{sc}}{P_{in}} \quad [1 - 14] \triangleleft$$

Le rendement peut être amélioré en augmentant le facteur de forme, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert.

### 1.4.6 Limites Fondamentales du Rendement [23]

**a : Rendement idéal** D'après la figure 1.5, on voit que la puissance délivrée par la cellule ne dépasse jamais la puissance disponible  $I_{sc}V_{oc}$ . Dans la cas idéale, on a :

$$P = VI < V_{oc}I_{sc} = \frac{k_B T}{q} I_{ph} \log \left( \frac{I_{ph}}{I_s} + 1 \right) \quad [1 - 15] \triangleleft$$

Cette équation montre que pour augmenter la puissance disponible, et par conséquent le rendement de la cellule, on doit augmenter le photocourant  $I_{ph}$  et diminuer le courant de saturation  $I_s$ . Dans les cellules réelles, plusieurs facteurs contribuent à la perte d'énergie, et par conséquent à la diminution du rendement. Les principaux facteurs sont cités ci-après.

**b : Pertes ohmiques** La résistance série ( $R_s$ ) cause un aplatissement de la caractéristique  $I-V$  (voir la figure 1.6). C'est un facteur fondamental qui fait perdre de la puissance à la cellule. L'influence de  $R_s$  peut être minimisée mais jamais annulée. Les bonnes cellules ont une résistance série inférieure  $0.1 \Omega$ .

**c : Courant de fuite** Les fuites dans les cellules, modélisées par  $R_p$  ( $G_p$ ), sont causées par les imperfections de la jonction surtout dans les bords de la cellule où des chemins de conduction superficielle se forment. La figure 1.7 montrent l'effet du courant de fuite sur la caractéristique  $I-V$ . Dans une cellule bien fabriquée,  $R_p$  est infinie ( $G_p$  est négligeable).

**d : Absorption incomplète** Les photons dont l'énergie est inférieure à la largeur de la bande interdite ( $E_g$ ) sont soit dissipés en chaleur soit absorbé par les contacts ohmiques. Plus  $E_g$  est élevée, plus ce phénomène est probable.

**e : Excès d'énergie** La plupart des photons qui génèrent des paires d'électron-trou ont plus d'énergie qu'il n'en faut. L'excès d'énergie est dissipé en chaleur. Dans ce cas, plus  $E_g$  est élevée, moins ce phénomène est probable.

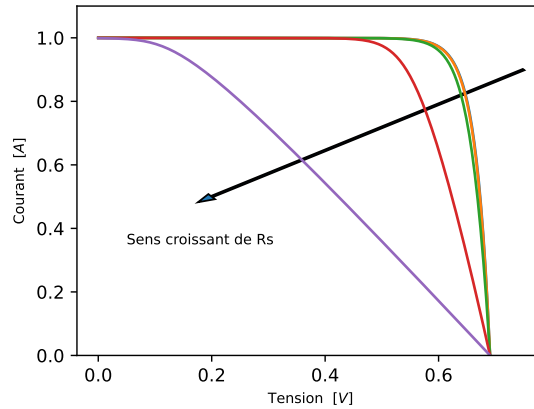


Figure 1.6 — EFFETE DE  $R_s$  SUR LA CARACTÉRISTIQUE  $I-V$  D'UNE SC.

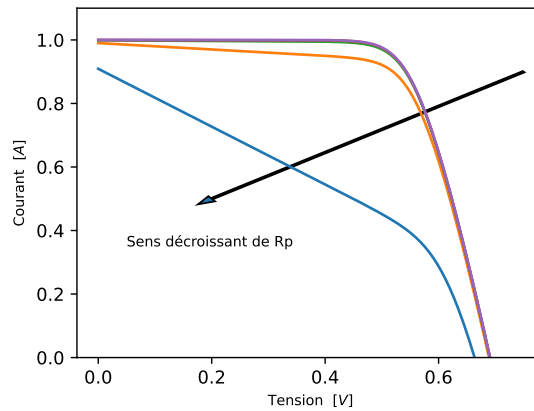


Figure 1.7 — EFFETE DE  $R_p$  SUR LA CARACTÉRISTIQUE  $I-V$  D'UNE SC.

**f : Réflexion** Une partie de la radiation incidente est réfléchiée à la surface de la cellule.

## 1.5 Modèles Électriques d'un Module PV

De nombreux modèles électriques ont été développés pour représenter la caractéristique  $I-V$  d'une cellule ou d'un module solaire [5, 25–27]. Ils prennent en compte les phénomènes de transport de charges électriques existant dans le composant : dérive, diffusion, génération, recombinaison, etc. Ces derniers sont en concurrence et l'importance des uns par rapport aux autres dépend de la SC et des conditions de fonctionnement.

Le modèle à une diode (*Single Diode Model (SDM)*) et le modèle à deux diodes (*Double Diode Model (DDM)*), représentés respectivement par les schémas équivalents des figures 1.8 et 1.9, sont les plus utilisés dans la littérature. Ils sont décrits dans ce qui suit.

### 1.5.1 Modèle à Une Diode

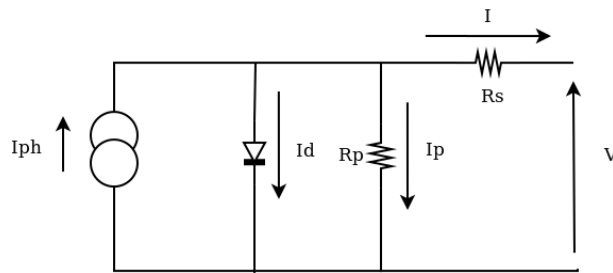


Figure 1.8 — CIRCUIT EQUIVALENT DU MODÈLE SDM D'UNE SC.

Le modèle SDM est le plus utilisé par les chercheurs et les constructeurs pour décrire le comportement de la plupart des SCs ou des SPs. Il est utilisé lorsque le courant de dérive est prépondérant. Son schéma équivalent (figure 1.8) comporte une diode en parallèle avec  $R_p$  et en série avec  $R_s$ . La relation courant-tension est alors décrite par l'équation :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{q(V + R_s I)}{n k_B T} \right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad [1 - 16] \triangleleft$$

le paramètre  $n$  est appelé facteur d'idéalité. C'est un nombre empirique, compris en général entre 1 et 2, utilisé pour ajuster la courbe  $I-V$  et prendre en compte des phénomènes de moindres importances. Si on utilise la conductance  $G_p$  au lieu de  $R_p$ , l'équation 1-16 devient :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{q(V + R_s I)}{n k_B T} \right) - 1 \right] - G_p (V + R_s I) \quad [1 - 17] \triangleleft$$

Lorsque les courant de fuites sont négligés ( $G_p = 0$ ), ce qui est souvent utilisé, le modèle se réduit à 4 paramètres ( $I_{ph}$ ,  $I_s$ ,  $n$  et  $R_s$ ) selon l'équation :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{q(V + R_s I)}{n k_B T} \right) - 1 \right] \quad [1 - 18] \triangleleft$$

### 1.5.2 Modèle à Deux Diodes

Lorsque le courant de recombinaison devient important, il doit être pris en compte en dressant une deuxième diode en parallèle à celle représentant le courant de dérive de la figure 1.8. On obtient le modèle DDM décrit par le schéma équivalent de la figure 1.9. La relation  $I-V$  est



alors donnée par :

$$I = I_{ph} - \frac{V + R_s I}{R_p} - I_{s1} \left[ \exp \left( \frac{q(V + R_s I)}{n_1 k_B T} \right) - 1 \right] - I_{s2} \left[ \exp \left( \frac{q(V + R_s I)}{n_2 k_B T} \right) - 1 \right] \quad [1 - 19] \triangleleft$$

où  $n_1$  et  $I_{s1}$  sont respectivement le facteur d'idéalité et le courant de saturation de la première diode et  $n_2$  et  $I_{s2}$  sont ceux de la deuxième.

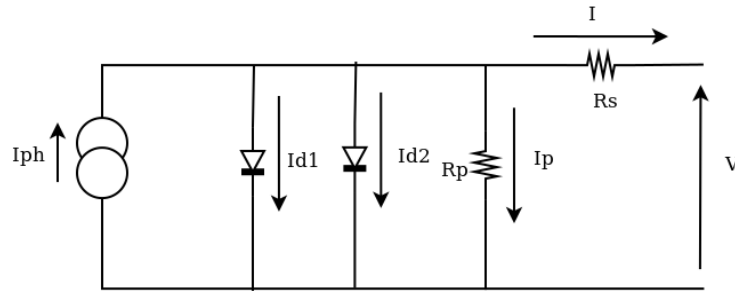


Figure 1.9 — CIRCUIT EQUIVALENT DU MODÈLE DDM D'UNE SC.

## 1.6 Association des Cellules Solaires PV

### 1.6.1 Association Série

Comme illustré par la figure 1.10, en regroupement des cellules identiques en série, elles seront traversées par le même courant. La caractéristique  $I-V$  résultante est obtenue par addition des tensions.

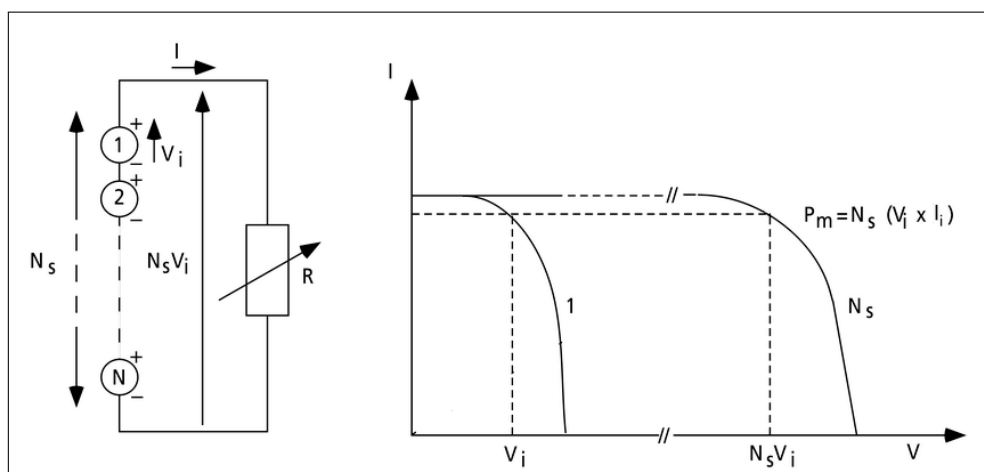


Figure 1.10 — Cellules identiques en série [24].

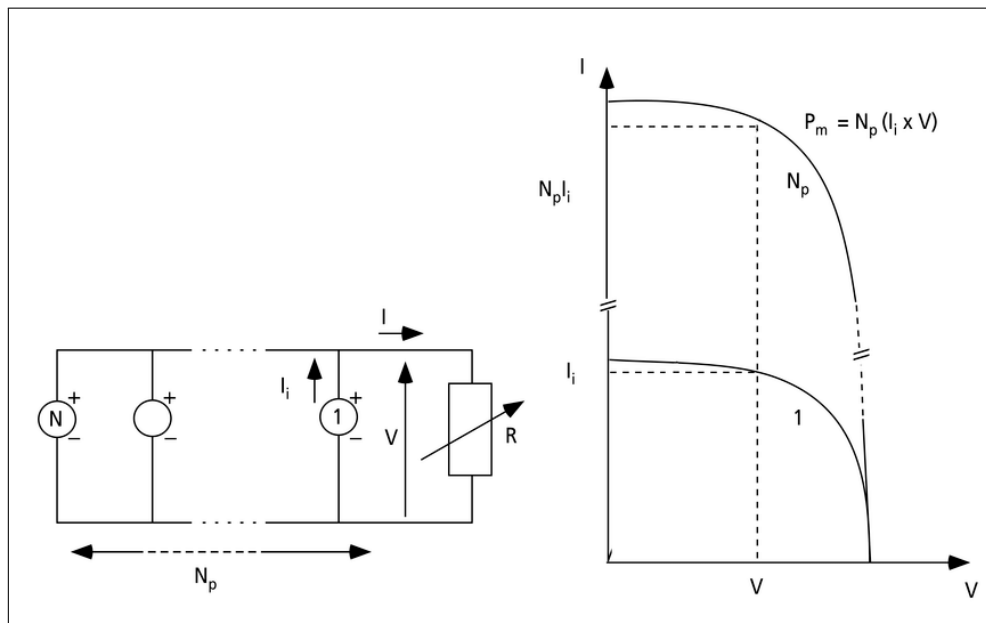


Figure 1.11 — Cellules identiques en parallèle [24].

### 1.6.2 Association Parallèle

La figure 1.11 illustre la mise en parallèle de cellules identiques. Elles sont soumises à la même tension et la caractéristique  $I-V$  résultante est obtenue par addition des courant.

### 1.6.3 Association Hybride

Dans le cas général, selon l’association en série et/ou en parallèle de cellules identiques, les valeurs du courant de court-circuit total et de la tension à circuit ouvert totale sont données par les relations [28] :

$$I_{sc}^t = N_p I_{sc} \tag{1 - 20}$$

$$V_{oc}^t = N_s V_{oc} \tag{1 - 21}$$

La figure 1.12 montre la caractéristique  $I-V$  résultante obtenue en associant en série  $N_s$  et en parallèle  $N_p$  cellules identiques.

La figure 1.13 montre le schéma équivalent d’un module PV [29, 30]. Il constitué par l’association en série de  $N_s$  cellules identiques formant une branche puis  $N_p$  de ces branches sont mises en parallèles. Les paramètres du modules sont déduites des paramètres d’une cellules individuelles comme le montre la figure. L’équation suivante donne la relation courant-tension

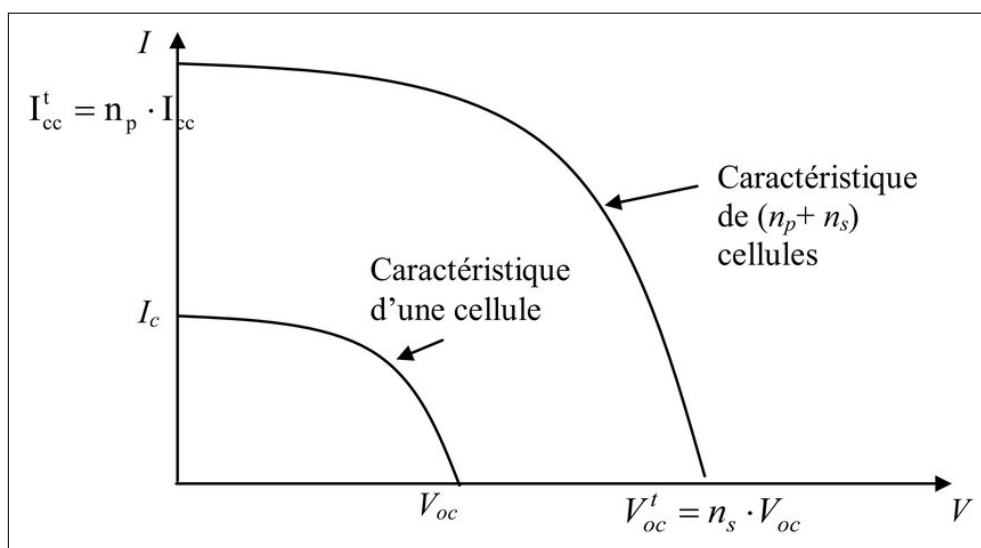


Figure 1.12 — Caractéristique I-V résultante obtenue en associant en série  $N_s$  et en parallèle  $N_p$  cellules identiques [28].

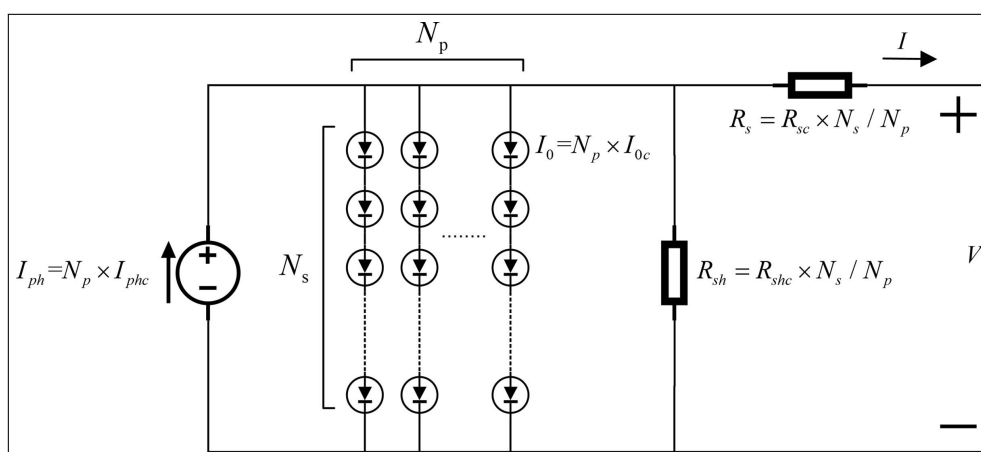


Figure 1.13 — Cellules identiques en parallèle [29].

d'un module PV selon le modèle DDM [30] :

$$I = N_p \times I_{ph} - N_p \times I_{s1} \left[ \exp \left( \frac{q(V + I R_s (N_s/N_p))}{n_1 N_s k_B T} \right) - 1 \right] - N_p \times I_{s2} \left[ \exp \left( \frac{q(V + I R_s (N_s/N_p))}{n_2 N_s k_B T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I R_s (N_s/N_p)}{R_p (N_s/N_p)} \quad [1 - 22] \triangleleft$$

Le modèle SDM est obtenu en omettant une des deux exponentielles :

$$I = N_p \times I_{ph} - N_p \times I_s \left[ \exp \left( \frac{q(V + I R_s (N_s/N_p))}{n N_s k_B T} \right) - 1 \right] - \frac{V + I R_s (N_s/N_p)}{R_p (N_s/N_p)} \quad [1 - 23] \triangleleft$$

## **1.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons donné des rappels et des notions générales sur l'énergie et les cellules solaires. Nous l'avons clôturé en donnant les modèles électriques et schémas équivalents les plus utilisés. Dans les chapitres suivants, nous traitons le problème de l'extraction des paramètres de ces modèles.

# Extraction des paramètres des dispositifs solaires

\*\*\*\*\*

---

2.1	Introduction . . . . .	19
2.2	Méthodes Non-Itératives . . . . .	21
2.3	Méthodes Itératives . . . . .	27
2.4	Applications et Commentaires . . . . .	41
2.5	Conclusion . . . . .	47

---

## 2.1 Introduction

Les systèmes photovoltaïques sont conçus autour de cellules (SC) et de panneaux solaires (SP) dont les fabricants tabulent les paramètres de performances dans les conditions de test standard (Standard Test Condition (STC)), correspondant à une insolation de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ . Les principaux paramètres sont le courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ), la tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ), le point de puissance maximale (MPP ( $P_m$ )), avec le courant ( $I_m$ ) et la tension ( $V_m$ ) correspondants, le rendement ( $\eta$ ) et le facteur de forme (FF), en plus des coefficients de température des ces paramètres. Étant donné que les systèmes PVs doivent souvent fonctionner au MPP loin des STC, les concepteurs doivent connaître les performances dans diverses conditions de fonctionnement. De plus, ils doivent estimer ces valeurs à partir de modèles mathématiques décrivant les caractéristiques *courant-tension* ( $I-V$ ).

Bien qu'on puisse trouver plusieurs modèles pour décrire les caractéristiques ( $I-V$ ) des SCs [25–27], le modèle à une seule diode (SDM) est le plus utilisé en pratique, vues sa simplicité et sa précision acceptable dans les conditions d'utilisation courantes. Il prédit la relation  $I-V$

par l'équation 1-17 (ou par l'équation 1-16 si on adopte  $R_p = 1/G_p$ ) qu'on rappelle ci-dessous :

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{nV_{th}}\right) - 1 \right] - G_p (V + R_s I) \quad [2-1] \triangleleft$$

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{nV_{th}}\right) - 1 \right] - \left(\frac{V + R_s I}{R_p}\right) \quad [2-2] \triangleleft$$

La solution exacte peut être exprimée par la fonction  $W$  de *Lambert* pour le courant [31]

$$I = \frac{n}{\beta R_s} W \left\{ \frac{\beta I_s R_s}{n(1 + R_s G_p)} \exp\left[\frac{V + R_s(I_s + I_{ph})}{n(1 + R_s G_p)}\right] \right\} + \frac{V G_p - (I_s + I_{ph})}{1 + R_s G_p} \quad [2-3] \triangleleft$$

et pour la tension

$$V = -\frac{n}{\beta} W \left\{ \frac{\beta I_s}{n G_p} \exp\left(\beta \frac{I + I_s + I_{ph}}{n G_p}\right) \right\} + I \left( R_s + \frac{1}{G_p} \right) + \frac{I_s + I_{ph}}{G_p} \quad [2-4] \triangleleft$$

où  $V_{th} = k_B T / q$  est la tension thermique et les autres grandeurs ont leurs significations déjà définies.  $I_{ph}$ ,  $I_s$ ,  $n$ ,  $R_s$  et  $G_p$  sont les paramètres du modèle **SDM**, communément supposés indépendants de la température et de la tension.

La nature implicite et non linéaire de l'équation 2-1 rend l'extraction des paramètres **SDM** à partir des caractéristiques  $I-V$  une tâche très difficile. Malgré le grand nombre de méthodes d'extraction proposées depuis les années 60, comme en témoignent les articles de revues [7-11, 25-27, 32-37], aucune n'est entièrement satisfaisante et il y a toujours *un besoin et un défi* d'en proposer de nouvelles. Les méthodes proposées sont soit non-itératives (directes), soit itératives (numériques) [5, 11].

Les méthodes non-itératives, principalement publiées avant l'année 2000, opèrent souvent dans des régions spécifiques des courbes  $I-V$  et nécessitent une connaissance préalable de certains points caractéristiques, tels que  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $I_m$ ,  $V_m$  et  $P_m$  [5]. Les méthodes numériques sont basées sur des algorithmes d'optimisation déterministes ou métaheuristiques (**MOA**) qui opèrent sur toute la courbe et ne nécessitent aucun point spécifique. Les algorithmes déterministes ont l'avantage d'être très rapides. Cependant, ils ont les inconvénients d'être basés sur des conditions initiales, de nécessiter des calculs de dérivées et de ne pas garantir une solution globale. Ces inconvénients peuvent être surmontés par les **MOA** [6], où les algorithmes évolutionnaires (**EA**) constituent une sous-classe importante. Par conséquent, ils sont de plus en plus utilisés dans l'estimation des paramètres des **SCs** [7, 25] (par exemple, Abbassi *et al.* ont revu près d'une centaine publiée uniquement entre les années 2008 et 2018 [7]).

Dans ce chapitre, nous donnons un bref rappel sur les deux classes d'extraction des paramètres. Nous ne considérons que les méthodes que nous avons appliqué à la fin du chapitre à certaines courbes  $I-V$  expérimentales qu'on trouve dans la littérature [14].

## 2.2 Méthodes Non-Itératives

Le problème de l'extraction des paramètres des SCs s'est posé au début des années 1960s. Les chercheurs et les concepteurs de circuits se sont rendu compte que les présences de  $R_s$  et de  $n$  influent drastiquement sur les performances de la cellule dont l'optimisation passe inévitablement par leurs déterminations précises. À cette époque, l'effet de  $G_p$  était peu considéré et la caractéristique  $I-V$  utilisée était celle représentée par l'équation 1-18.

La première méthode à être utilisée est *la méthode standard*. Pour les tensions  $V \gg nk_B T/q = n/\beta$ , l'expression du courant peut être simplifiée comme suit :

$$I = I_{ph} - I_s \exp [n (V + R_s I) / \beta] \quad [2 - 5] \triangleleft$$

par passage au log, on obtient l'expression :

$$\log [I_{ph} - I] = \log [I_s] + \frac{\beta}{n} V + \frac{\beta}{n} R_s I \quad [2 - 6] \triangleleft$$

Le tracé de la courbe de  $\log [I_{ph} - I]$  en fonction de  $V$  pourrait contenir une région linéaire si  $R_s$  est suffisamment petite. Dans cette région, l'équation de la courbe devient :

$$\log [I_{ph} - I] = \log [I_s] + \frac{\beta}{n} V \quad [2 - 7] \triangleleft$$

On pourra alors déterminer  $n$  et  $I_s$  respectivement de la pente de la courbe et de son intersection avec l'axe des abscisses.  $I_{ph}$  est identifié à  $I_{sc}$  soit par détermination graphique, soit fournit par le fabricant. Une fois  $n$ ,  $I_s$  et  $I_{ph}$  déterminés, leurs valeurs sont injectées dans l'une des équations précédentes (les équation 2-5 et 2-6) pour déterminer la valeur de  $R_s$ .

Lorsque la valeur de  $R_s$  est assez grande de sorte que la courbe  $\log [I_{ph} - I]$  en fonction de  $V$  ne contient aucune zone linéaire, la détermination de  $R_s$  devient problématique. Des méthodes plus élaborées sont nécessaires.

Wolf et Rauschenbach [38] ont proposé une méthode simple pour extraire  $R_s$ . Elle consiste à prélever deux courbes  $I-V$  ( $C_1$  et  $C_2$ ) de la cellule à deux intensités lumineuses différentes ( $S_1$  et  $S_2$ ). Chaque courbes aura son propre courant de court-circuit,  $I_{sc1}$  et  $I_{sc2}$ . En prenant un point sur la courbe  $C_1$  de coordonnées  $(V_1, I_1)$  et un point sur la courbe  $C_2$  de coordonnées  $(V_2,$

$I_2$ ), ils ont établi la relation suivante

$$V_2 = V_1 - \Delta I_{sc} \cdot R_s = V_1 - (I_{sc2} - I_{sc1}) \cdot R_s, \quad [2 - 8] \triangleleft$$

qui permet de déduire la valeur de  $R_s$ . Cette méthode reste à nos jours très utilisée pour une détermination rapide de  $R_s$  avec une précision acceptable\*.

Si cette méthode a résolu le problème de  $R_s$ , celui de  $I_{ph}$ ,  $I_s$ ,  $n$  et  $G_p$  ( $R_p$ ) est resté posé. Pour résoudre ce problème, plusieurs catégories de méthodes ont vu le jour, dont les plus importantes sont :

- les méthodes analytiques
- les méthodes algébriques
- les méthodes à base de calcul de conductance
- les méthodes à base de calcul d'intégrale

On donne un bref aperçu de ces méthodes dans la paragraphes suivants.

### 2.2.1 Méthodes Analytiques

Pour extraire les valeurs des paramètres, les méthodes analytiques utilisent des points caractéristiques sur la courbe  $I-V$  dont le courant de court-circuit  $I_{sc}$ , la tension en circuit ouvert  $V_{oc}$ , le courant  $I_m$  et la tension  $V_m$  à puissance maximale et l'inverse de la pente  $R_{s0}$  à  $I_{sc}$  et son inverse  $R_{p0}$  à  $V_{oc}$ . Dans ce qui suit, nous introduisons deux de ces méthodes : la méthode de Picciano [39] et la méthode des cinq point (Phang *et al.*) [40]. La première est l'une des premières méthodes à être proposée et la deuxième est la plus connue et la plus utilisée de cette catégorie. Une revue de ces méthodes peut être trouvée dans [32, 34, 35, 37].

#### 2.2.1.1 La Méthode de Picciano :

Picciano a proposé en 1968 [39] une méthode analytique qui calcule les paramètres SDM en utilisant les points caractéristiques de la courbe  $I-V$  :  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_m$ ,  $I_m$  et  $R_{s0}$  ( $= 1/m$ ). Pour les tensions  $V \gg nk_B T/q$ , l'expression de la tension peut s'écrire sous la forme [39] :

$$V = A + B \log[I_{ph} - I] - R_s I \quad [2 - 9] \triangleleft$$

où :

$$B = \frac{n k_B T}{q} \quad [2 - 10] \triangleleft$$

$$A = -B \log[I_s]$$

\*. À l'écriture de ces lignes, l'article [38] a récolté 624 citations selon la base Scopus.



en faisant quelques opérations algébriques, on obtient l'ensemble des équations suivantes :

$$I_{ph} = I_{sc} - \frac{mB}{1 + mR_s} \simeq I_{sc} \quad [2 - 11] \triangleleft$$

$$B = \frac{2V_m - V_{oc}}{\frac{I_m}{I_{ph} - I_m} + \log \left[ \frac{I_{ph} - I_m}{I_{ph}} \right]}$$

$$R_s = \frac{V_m}{I_m} - \frac{B}{I_{ph} - I_m} \quad [2 - 12] \triangleleft$$

$$A = V_{oc} - B \log[I_{ph}] \quad [2 - 13] \triangleleft$$

$$n = \frac{Bq}{k_B T} \quad [2 - 14] \triangleleft$$

La résolution de ces équations donne les paramètres **SDM** de la **SC**. On note que si on adopte l'approximation  $I_{ph} \approx I_{sc}$  dans l'équation 2-11, la solution des équations est directe sinon un processus itératif est nécessaire pour résoudre les équations (par exemple par la méthode de Newton-Raphson).

### 2.2.1.2 La Méthode des cinq Points

Phang *et al.* ont proposé en 1984 [40] une méthode analytique qui permet de trouver les cinq paramètres **SDM** d'une **SC** en utilisant les points caractéristiques de la courbe  $I-V$  :  $V_{oc}$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_m$ ,  $I_m$ ,  $R_{s0}$  et  $R_{p0}$ . Partant de l'équation 2-2, ils reprennent les équations non-linéaires suivantes établies par K.L Kennerud et Charles [41, 42]

- au point de circuit ouvert,  $V = V_{oc}$ ,  $I = 0$  :

$$0 = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{V_{oc}}{nV_{th}} \right) - 1 \right] - \left( \frac{V_{oc}}{R_p} \right) \quad [2 - 15] \triangleleft$$

- au point de court circuit,  $V = 0$ ,  $I = I_{sc}$  :

$$I_{sc} = I_{ph} - I_s \left[ \exp \left( \frac{R_s I_{sc}}{nV_{th}} \right) - 1 \right] - \left( \frac{R_s I_{sc}}{R_p} \right) \quad [2 - 16] \triangleleft$$

- la dérivé au circuit ouvert :

$$\frac{1}{R_{p0}} = -\frac{I_s}{nV_{th}} \left\{ \left( 1 + \frac{R_s}{R_{p0}} \right) \cdot \exp \left[ \frac{V_{oc}}{nV_{th}} \right] \right\} - \frac{1 + R_s/R_{p0}}{R_p} \quad [2 - 17] \triangleleft$$

- la dérivé au court-circuit :

$$\frac{1}{R_{s0}} = -\frac{I_s}{nV_{th}} \left\{ \left( 1 + \frac{R_s}{R_{s0}} \right) \cdot \exp \left[ \frac{I_{sc} R_s}{nV_{th}} \right] \right\} - \frac{1 + R_s/R_{s0}}{R_p} \quad [2 - 18] \triangleleft$$

- la dérivé au point de puissance maximale :

$$-\frac{I_m}{V_m} = -\frac{I_s}{nV_{th}} \left\{ \left( 1 - \frac{I_m}{V_m} R_s \right) \cdot \exp \left[ \frac{V_m + I_m R_s}{nV_{th}} \right] \right\} - \frac{1}{R_p} \left[ 1 - \frac{I_m}{V_m} R_s \right] \quad [2 - 19] \triangleleft$$

Kerrrud [42] et Charles *et al.* [41] ont établi leur méthodes en résolvant ces équations par la méthode itérative de Newton-Raphson. Il est bien connu que cette méthode exige un bon point initial pour converger et dans beaucoup de situation, il est très difficile d'en trouver un. Phang *et al.* [40] proposent comme alternative de les résoudre analytiquement. En remarquant que :

- $\exp(V_{oc}/nV_{th}) \gg \exp(I_{sc}R_s/nV_{th})$ ,
- $R_p \gg R_s$ ,
- $I_s nV_{th} \gg 1/R_p$
- et  $I_s/nV_{th} \exp(I_{sc}R_s/nV_{th})$  est négligeable,

ils déduisent les équations simplifiée suivantes :

$$0 = I_s \exp \left( \frac{V_{oc}}{nV_{th}} \right) + \left( \frac{V_{oc}}{R_p} \right) - I_{sc} \quad [2 - 20] \triangleleft$$

$$0 = (R_{s0} - R_s) \frac{I_s}{nV_{th}} \exp \left( \frac{V_{oc}}{nV_{th}} \right) - 1 \quad [2 - 21] \triangleleft$$

$$R_p = R_{p0} \quad [2 - 22] \triangleleft$$

$$0 = I_s \exp \left( \frac{V_{oc}}{nV_{th}} \right) + \frac{V_{oc} - V_m}{R_p} - I_m - I_s \exp \left( \frac{V_m + R_s I_m}{nV_{th}} \right) \quad [2 - 23] \triangleleft$$

$$n = \frac{V_m + R_{s0} I_m - V_{oc}}{V_{th} \left\{ \log \left( I_{sc} - \frac{V_m}{R_{p0}} - I_m \right) + \log \left( I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_{p0}} \right) + \frac{I_m}{I_{sc} - V_{oc}/R_{p0}} \right\}} \quad [2 - 24] \triangleleft$$

$$I_s = \left( I_{sc} - \frac{V_{oc}}{R_p} \right) \exp \left( \frac{-V_{oc}}{nV_{th}} \right) \quad [2 - 25] \triangleleft$$

$$R_s = R_{s0} - \frac{nV_{th}}{I_s} \exp\left(\frac{-V_{oc}}{nV_{th}}\right) \quad [2 - 26] \triangleleft$$

$$I_{ph} = I_{sc} \left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right) + I_s \left(\exp\left(\frac{I_{sc}R_s}{nV_{th}}\right) - 1\right) \quad [2 - 27] \triangleleft$$

### 2.2.2 Méthodes à Base de Calcul de Conductance

Werner [43] a proposé une méthode à base du calcul numérique de la conductance ( $G = dI/dV$ ) pour l'extraction des trois paramètres **SDM** de la diode Schottky :  $I_s$ ,  $n$  et  $R_s$ . Pour  $G_p$ , il propose de la déduire de la caractéristique inverse et de corriger le courant (en retrancher la valeur  $G_p V$  puisque dans le régime inverse, on a généralement  $V = G_p I$ ). Il propose trois plots linéaires, qu'il dénote *plots A, B et C*, pour extraire les paramètres :

$$\text{Plot A :} \quad \frac{G}{I} = \frac{q}{nV_{th}} (1 - G R_s) \quad [2 - 28] \triangleleft$$

$$\text{Plot B :} \quad \frac{1}{G} = \frac{nV_{th}}{q I} + R_s \quad [2 - 29] \triangleleft$$

$$\text{Plot C :} \quad \frac{dV}{d \log I} = R_s I + n V_{th} \quad [2 - 30] \triangleleft$$

$n$  et  $R_s$  peuvent être obtenus par la pente et l'intersection avec l'axe des ordonnées des tracés ( $G/I$ -vs- $G$ ) ou ( $1/G$ -vs- $1/I$ ) ou ( $dV/d \log I$ -vs- $I$ ) respectivement pour des *plots A* ou *B* ou *C*. La méthode ne permet pas de trouver  $I_s$ , il faut le déduire par la méthode standard modifiée  $\log I$ -vs- $V_d$  : une fois  $R_s$  trouvée, les valeurs de la tension sont ajustées à  $V_d = V - R_s I$ .

Ouennoughi *et al.* [44] ont étendu le *plot A* pour les **SCs** en proposant le plot suivant qu'ils ont appelé simple conductance :

$$\frac{G}{(I_{ph} - I)} = -\frac{\beta}{n} (1 + R_s G) \quad [2 - 31] \triangleleft$$

Le tracé de  $G/(I_{ph} - I)$ -vs- $G$  donne  $n$  et  $R_s$ .  $I_{ph}$  est approximé à  $I_{sc}$ .

### 2.2.3 Méthodes Algébriques

Dans ces méthodes, on fait des manipulations algébriques sur l'équation 1-16 pour trouver une fonction auxiliaire dont les caractéristiques sont reliées aux paramètres **SDM** : un maximum, un minimum, une pente, etc. La méthode de Norde [45] a été la première à être proposée pour la diode Schottky, suivie par plusieurs autres qui ont été adaptées aux **SCs** (voir [46, 47] pour une revue). Dans ce qui suit, on introduit les méthodes de Nehaoua *et al.* [48] et Chegaar *et al.* [49].

### 2.2.3.1 Méthode de Nehaoua

Nehaoua *et al.* [48] proposent la fonction linéaire  $Y$ -vs- $X$  suivante pour trouver les paramètres de la SC éclairée :

$$Y = \frac{\beta}{n} (R_s + X) \quad [2 - 32] \triangleleft$$

avec

$$Y = \frac{1}{I - I_0} \ln \left( \frac{I_{ph} - I}{I_{ph} - I_0} \right) \quad [2 - 33] \triangleleft$$

$$X = \frac{V - V_0}{I - I_0} \quad [2 - 34] \triangleleft$$

$(I_0, V_0)$  est un point fixe de la courbe  $I-V$ . Le tracé de  $Y$  en fonction de  $X$  donne respectivement  $n$  et  $R_s$  à partir de la pente et de l'ordonnée à l'origine. La méthode est une extension de celle de Kaminski *et al.* [50] proposée pour la cellule à l'obscurité (en posant  $I_{ph} = 0$ , on retrouve les expressions de Kaminski).  $G_p$  et  $I_s$  sont déduits de la même façon que la méthode de Werner et  $I_{ph}$  est pris approximativement pour  $I_{sc}$ .

### 2.2.3.2 Méthode de Chegaar

Chegaar *et al.* [49] proposent de trouver les paramètres  $P=[I_s, n, R_s, G_p]$  en minimisant la fonction suivante par la méthode de Newton :

$$S(P) = \sum_{i=1}^N [G - G_i(V_i, I_i, P)]^2 \quad [2 - 35] \triangleleft$$

avec  $G_i = dI_i/dV_i$  est la conductance calculé au point expérimental  $(V_i, I_i)$  et  $G$  est la conductance théorique donné par

$$G = -\frac{\chi}{1 + R_s \chi} \quad [2 - 36] \triangleleft$$

où

$$\chi = \frac{\beta}{n} I_s \exp \left\{ \frac{\beta}{n} (V + R_s I) \right\} + G_p \quad [2 - 37] \triangleleft$$

Une fois  $P$  trouvé,  $I_{ph}$  peut facilement être déduit [49].

### 2.2.4 Méthodes à Base de Calcul d'Intégrale

Ortiz-Conde *et al.* [51] définissent la fonction *Co-Content* par l'intégrale suivante :

$$CC(I, V) = \int_0^V (I - I_{sc}) dV \quad [2 - 38] \triangleleft$$

En substituant l'équation 2-3 dans l'équation 2-38, puis en utilisant l'équation 2-4 et quelques manipulations algébriques, ils trouvent :

$$CC(I, V) = C_{V1}V + C_{I1}(I - I_{sc}) + C_{IV}V(I - I_{sc}) + C_{V2}V^2 + C_{I2}(I - I_{sc})^2 \quad [2 - 39] \triangleleft$$

avec :

$$C_{I1} = R_s(I_s + I_{ph} + I_{sc}) + \frac{n}{\beta}(1 + R_s G_p) + I_{sc} R_s^2 G_p \quad [2 - 40] \triangleleft$$

$$C_{V1} = -(I_s + I_{ph} + I_{sc}) - \frac{n}{\beta} G_p - I_{sc} R_s G_p \quad [2 - 41] \triangleleft$$

$$C_{I2} = \frac{R_s(1 + R_s G_p)}{2} \quad [2 - 42] \triangleleft$$

$$C_{V2} = \frac{G_p}{2} \quad [2 - 43] \triangleleft$$

$$C_{IV} = \frac{1 - \sqrt{1 + 16 C_{I2} C_{V2}}}{2} \quad [2 - 44] \triangleleft$$

Les coefficients  $C_{V1}$ ,  $C_{V2}$ ,  $C_{I1}$ ,  $C_{I2}$  sont trouvés par muliregression. Après quelques manipulations, on peut déduire les valeurs des quatre paramètres comme suit :

$$G_p = 2 C_{V2} \quad [2 - 45] \triangleleft$$

$$R_s = \frac{\sqrt{1 + 16 C_{V2} C_{I2}} - 1}{4 C_{V2}} \quad [2 - 46] \triangleleft$$

$$n = \beta \frac{C_{V1}(\sqrt{1 + 16 C_{V2} C_{I2}} - 1) + 4 C_{I1} C_{V2}}{4 C_{V2}} \quad [2 - 47] \triangleleft$$

$$I_{ph} = -\frac{(1 + \sqrt{1 + 16 C_{V2} C_{I2}})(C_{V1} + I_{sc})}{2} - 2 C_{I1} C_{V2} \quad [2 - 48] \triangleleft$$

Le courant de saturation  $I_s$  est calculé à partir de l'équation 2-1 évaluée à la tension de circuit ouvert  $V_{oc}$  :

$$I_s = \frac{I_{ph} - V_{oc} G_p}{\exp(\beta V_{oc}/n)} \quad [2 - 49] \triangleleft$$

## 2.3 Méthodes Itératives

Les méthodes itératives sont des algorithmes d'optimisation qui extraient les paramètres d'une SC en minimisant une fonction objectif. Ils exploitent la courbe  $I-V$  entière représentée

par  $N$  données expérimentales  $(I_{exp,i}, V_{exp,i}), i \in [1, N]$ .

La fonction objectif la plus utilisée est la **Root Mean Square Error (RMSE)** définie par :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [I_{exp,i} - I_{cal,i}]^2} \quad [2 - 50] \triangleleft$$

où  $I_{cal,i}$  est le courant calculé selon le modèle utilisé de la cellule dont le plus utilisé est le **SDM** représenté par l'équation 2-1. Il existe des variantes qui ont montrées leur supériorité et leurs robustes mais qui sont moins utilisées à cause de la difficulté de leur mise œuvre :

- **Méthode d'Optimisation Verticale (VOM)** [52], où la fonction objectif  $S_I$  représente la moyenne quadratique des erreurs relatives du courant

$$S_I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{I_{exp,i} - I_{cal,i}}{I_{cal,i}} \right]^2} \quad [2 - 51] \triangleleft$$

- la **Méthode d'Optimisation Latérale (LOM)** [53], où la fonction objectif  $S_V$  représente la moyenne quadratique des erreurs relatives de la tension

$$S_V = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ \frac{V_{exp,i} - V_{cal,i}}{V_{cal,i}} \right]^2} \quad [2 - 52] \triangleleft$$

Parmi les méthodes itératives, on trouve les méthodes classiques (déterministes), et les méthodes métaheuristiques. Les premières sont dominées par celles à base de gradient (par exemple Méthodes des gradients, la descente la plus rapide, Newton-Raphson et Levenberg-Marquardt). Elles sont rapides mais elles ont deux inconvénients majeurs :

- leur convergence dépend du choix du point initial
- et elles éprouvent de grandes difficultés à sortir des minimums locaux

Bien que moins rapides, les méthodes métaheuristiques se comportent beaucoup mieux face à ces problèmes et ont un avantage supplémentaire : elles ne nécessitent pas de calculs de dérivées.

### 2.3.1 Méthodes à Base de Gradient

Le principe de ces méthodes est de résoudre le système d'équations non-linéaires

$$\frac{\partial S}{\partial P_i} = 0; \quad i \in [1, N] \quad [2 - 53] \triangleleft$$

obtenu en dérivant la fonction *objectif*  $S$  par rapport aux  $N$  paramètres  $P_i$  du modèle. La méthode de Newton-Raphson est la plus utilisée pour résoudre un tel système.

### 2.3.2 Extraction par Méthodes Métaheuristiques

Les métaheuristiques sont des algorithmes stochastiques itératifs qui cherchent l'optimum global d'une fonction objectif,  $Obj$ , en se basant seulement sur l'évaluation de la fonction et n'exploitent aucune de ses propriétés. Ce sont des techniques d'optimisation indépendantes du problème posé qui ont montré leur efficacité à résoudre des problèmes complexes difficiles et même impossibles à résoudre par les méthodes *basées-gradient* classiques. Les métaheuristiques sont classées en deux catégories [54] :

- *Algorithmes basés-voisinage* : Ce sont des algorithmes de recherche locale qui gardent trace des solutions de voisinage. À chaque itération, la solution se déplace vers la solution du voisinage de façon à améliorer la fonction  $Obj$ . Parmi ces algorithmes on trouve le recuit simulé (*Simulated Annealing*) et la *recherche Tabu*.
- *Algorithmes basés-population* : Ce sont des algorithmes qui agissent sur un ensemble de solutions appelé population. Ils s'inspire de la nature en cherchant l'analogie avec un phénomène naturel. On les classe en deux sous-classes :
  - *Swarm Intelligence (SI) (Intelligence en Essaim)* : Ils exploitent le comportement socio-coopératif existant dans plusieurs espèces dans la nature. On trouve : *Particle Swarm Optimization (PSO)*, *Ant Colony Optimization (ACO)* et *Artificial Bee Colony Optimization (ABCO)*.
  - *Evolutionary Algorithms (EA) (Algorithmes Évolutionnaires)* : Ils suivent la théorie de l'évolution des espèces. On y trouve les Algorithmes Génétiques (**GA**), L'Évolution Différentielle (**DE**) et la Programmation Génétique.

Dans ce qui suit, nous introduisons les méthodes qu'on a considéré dans ce travail : **GAs**, **DE** et **PSO**.

#### 2.3.2.1 Algorithmes Génétiques (GAs)

##### 2.3.2.1.1 Principe des GAs

Depuis leur introduction par Holland [55], les **GAs** ont été étudiés, développés et utilisés pour résoudre des problèmes complexes en science et ingénierie [56, 57], apprentissage automatique [58], économie et finance [59], conception VLSI [60], la conception de systèmes embarqués [61] et bien d'autres [62, 63]. Les **GAs** sont des méthodes métaheuristiques qui imitent les principes de sélection naturelle et la génétique de Darwin, c'est-à-dire la survie du plus fort (apte) (*survival of the fittest*) [6, 64], et utilisent des opérateurs génétiques tels la sélection, la mutation et le croisement.

La figure 2.1 illustre l'organigramme de base des **GAs**. Ils procèdent à l'étape d'initialisation par générer de manière aléatoire, une population initiale (génération) de  $N_{pop}$  individus

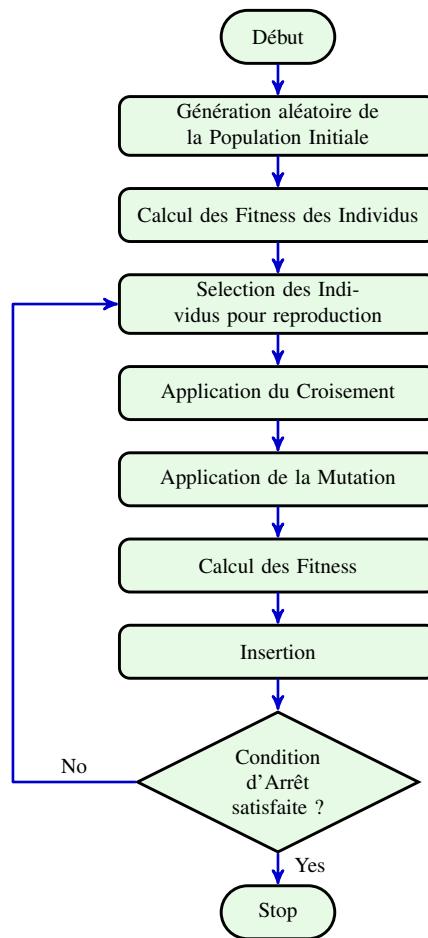


Figure 2.1 — ORGANIGRAMME DE BASE DES GAs

(*chromosomes*) produisant chacun une solution candidate et attribuent aux *chromosomes* une mesure (*fitness*) basée sur La fonction Obj. Les *chromosomes* sont codés sous forme de chaînes ou de vecteurs de variables (*gènes*) tirés d'un alphabet dont les plus utilisés sont le binaire, l'entier et à valeurs réelles. Pour accélérer la convergence, ils sont généralement délimités entre des valeurs maximales et minimales. Ensuite, les GAs transforment itérativement la génération en appliquant les opérateurs génétiques de sélection, de croisement, de mutation et d'insertion jusqu'à ce qu'une condition d'arrêt soit satisfaite [65–67]. Habituellement, deux *chromosomes* parents sont sélectionnés avec une forte probabilité  $p_{cros}$  et combinés avec un opérateur de croisement (*Crossover Operator XO*) pour produire deux *chromosomes* enfants (*offspring*). L'opérateur de mutation sélectionne certains *chromosomes* avec une faible probabilité  $p_{mut}$  et modifie les valeurs de leurs *gènes*. En pratique,  $p_{cros}$  et  $p_{mut}$  sont choisis respectivement dans les plages [0.7, 1.0] et [0.001, 0.2]. Enfin, les enfants sont insérés dans la population s'ils ont un bon *fitness*, et les plus mauvais individus sont écartés.

Il existe deux variantes principales des GAs : GAs codés binaire (*Binary-Coded GAs*



**BCGA**) et **GAs** codés réel (*Real Coded GAs RCGA*) [68]. La différence vient de la façon de coder les *chromosomes* : dans la **BCGA** qui est historiquement la version initiale des **GAs** [64], les paramètres représentant une solution du problème sont codées par des chaînes de *bits* (0 et 1) concaténés pour former les *gènes* d'un *chromosome*, alors que dans la **RCGA**, chaque *chromosome* est un vecteur dont les composantes sont les paramètres de la solution. Le choix de la variante à utiliser est crucial, il conditionne l'opérateur **XO** à appliquer, étant donné qu'on considère que les **GAs** tirent leur puissance de cet opérateur [69, 70]. Les autres opérateurs ont une moindre importance. On introduit ci-dessous les **XOs** qu'on a utilisé dans ce travail.

### 2.3.2.1.2 Opérateurs Crossover

Dans ce qui suit, nous donnons de brèves définitions des opérateurs **UXO**, **AXO** et **BXO** qu'on a utilisé dans ce travail.

#### Opérateur uniforme

Historiquement, les **GAs** ont été proposés avec **BCGA** [64] où l'opérateur **XO** uniforme (**UXO**) fût le premier à être utilisé [64]. Lorsque deux individus parents sont mixés, chaque *gène* des *offspring* provient aléatoirement du premier ou du second parent. Lorsque **RCGA** a été utilisé pour mieux représenter les problèmes du monde réel, l'opérateur **XO** a été utilisé. Le *gène* qui était un *bit* dans la **BCGA** devient la valeur d'un paramètre. Il n'y a plus aucun moyen de changer la valeur du paramètre créé lors de l'initialisation autre que par la *mutation*. Ceci constitue un défaut à cet opérateur et a poussé les chercheurs à proposer des alternatives adéquates tels que *Arithmetic Crossover Operator* (**AXO**), *Blend Crossover Operator* (**BXO**) et *Simulated Binary Crossover* (**SBX**).

#### Opérateur arithmétique

Étant donnés deux parents  $x$  et  $y$  ayant pour *gènes* respectifs  $x_i$  et  $y_i$  et des nombres  $\alpha_i$  dans l'intervalle  $[0, 1]$ , l'opérateur de croisement arithmétique (**AXO**) crée deux enfants  $z$  et  $w$  dont les *gènes*  $z_i$  et  $w_i$  sont :

$$\begin{aligned} z_i &= \alpha_i x_i + (1 - \alpha_i) y_i \\ w_i &= \alpha_i y_i + (1 - \alpha_i) x_i \end{aligned} \quad [2 - 54] \triangleleft$$

où  $\alpha_i$  sont soit des nombres aléatoires uniformes, soit des constantes dans **AXO** uniforme et non uniforme, respectivement. **AXO** réduit la dynamique (l'intervalle) des valeurs des *gènes* dans la population.

### Opérateur de fusion (blend)

Étant donné  $d_i = \text{abs}(x_i - y_i)$  et un nombre  $\alpha$  fixé généralement 0.5, l'opérateur de croisement *Blend* (**BXO**) crée un enfant  $U$  dont les gènes sont des nombres aléatoires uniformes dans l'intervalle  $U_i$  donné par [32] :

$$U_i = [\min(x_i, y_i) - \alpha d_i, \max(x_i, y_i) + \alpha d_i] \quad [2 - 55] \triangleleft$$

**BXO** élargit l'intervalle de recherches des valeurs des gènes dans la population.

### 2.3.2.2 Évolution Différentielle

#### 2.3.2.2.1 Schéma Classique de Base

L'Évolution Différentielle (**DE**) est un algorithme stochastique, de la classe des algorithmes évolutionnaires (**EAs**), qui recherche l'optimum global d'une fonction dans l'espace continu. Il a été proposé par Storn et Price en 1995 [71–74] pour répondre à quatre exigences :

- Habilité à manipuler des fonctions *objectifs* non-différentiables, non-linéaires et multimodales.
- Facilité de Parallélisation pour faire face au volume de calculs intensifs des fonctions *objectifs*.
- Facilité d'utilisation : un nombre réduit de variables de contrôle, robustes et faciles à choisir.
- Bonnes propriétés de convergence.

Comme tout algorithme **EA**, **DE** procède en deux phases, initialisation et évolution où la population passe par trois (3) opérations : mutation, *crossover* et selection, comme le montre l'organigramme de la figure 2.2. Storn et Price [72] décrivent ces phases de façon détaillée, comme suit (on adopte la notation  $Z_{i,j,G}$  ( $Z = X, U, V$ ) pour désigner la valeur de la composante  $j$  du vecteur  $Z_i$  à la génération  $G$ ) :

**Initialisation** : Étant donnés deux vecteurs  $X^{\min}$  et  $X^{\max}$  de dimension  $D$ , définissant respectivement les bornes *min* et *max* des paramètres à optimiser, chaque vecteur de décision  $X_i$  est initialisé à la première génération ( $G = 0$ ) comme suit :

$$X_{i,j,0} = X_j^{\min} + \text{rnd}(0, 1) \cdot (X_j^{\max} - X_j^{\min}) \quad \text{pour } j = 1 \dots D \quad [2 - 56] \triangleleft$$

où  $\text{rnd}(0, 1)$  est un générateur aléatoire uniforme donnant des nombres  $\in [0, 1]$ .

**Mutation** : Pour chaque vecteur de décision  $X_{i,G}$  (*target*), sélectionner trois vecteurs d'indices

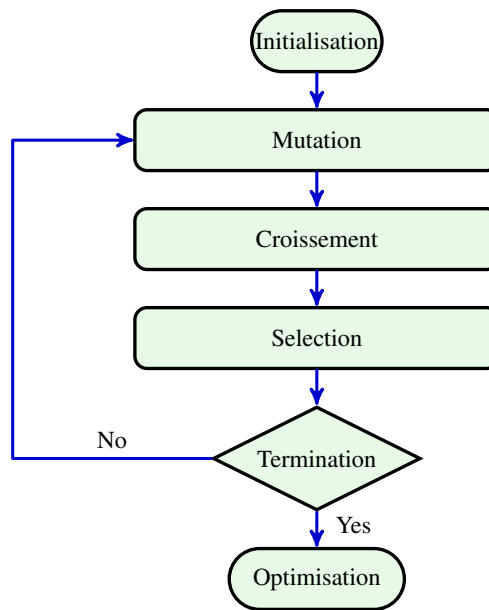


Figure 2.2 — ORGANIGRAMME DE L'ALGORITHME DE

$r1, r2$  et  $r3 \in \{1, \dots, N_p\}$  tel que  $r1 \neq r2 \neq r3 \neq i$ . Le vecteur *mutant*  $V_{i,G}$  est généré par la combinaison

$$V_{i,G} = X_{r1,G} + F \cdot (X_{r2,G} - X_{r3,G}) \quad [2 - 57] \triangleleft$$

Le facteur  $F \in [0, 2]$  contrôle l'amplification de la différence  $(X_{r2,G} - X_{r3,G})$ . C'est de cette différence que l'algorithme tient son nom. Autrement dit, le vecteur  $X_{r1,G}$ , appelé vecteur *base*, est perturbé par la différence  $(X_{r2,G} - X_{r3,G})$  amplifiée par le facteur  $F$ .

**Croisement :** Former le vecteur *trial*  $U_{i,G}$  en combinant les vecteurs *mutant*  $V_{i,G}$  et *target*  $X_{i,G}$  selon la relation

$$U_{i,j,G} = \begin{cases} V_{i,j,G} & \text{si } \text{rnd}(0, 1) \leq CR \text{ ou } \text{rndint}(1, D) = j \\ X_{i,j,G} & \text{sinon} \end{cases} \quad \text{pour } j = 1 \dots D \quad [2 - 58] \triangleleft$$

où  $CR$  est la constante (ou probabilité) de croisement  $\in [0, 1]$  et  $\text{rndint}(1, D)$  est un générateur aléatoire qui produit un nombre entier entre 1 et  $D$ . La condition " $\text{rndint}(1, D) = j$ " garantit que le vecteur *trial*  $U_{i,G}$  contient au moins un paramètre du vecteur *mutant*  $V_{i,G}$ .

**Sélection :** Soit  $\text{Obj}$  la fonction *objectif* à minimiser.  $U_{i,G}$  remplace  $X_{i,G}$  dans la population à la génération  $(G + 1)$  si son résultat est meilleur

$$X_{i,G+1} = \begin{cases} U_{i,G} & \text{si } \text{Obj}(U_{i,G}) \leq \text{Obj}(X_i) \\ X_{i,G} & \text{sinon} \end{cases} \quad [2 - 59] \triangleleft$$

Les équation 2-56, 2-57, 2-58 et 2-59 montrent la simplicité de l'algorithme DE. Malgré cette simplicité, DE est un algorithme puissant et robuste dont l'efficacité a été démontrée avec succès dans de nombreux domaines d'applications [75–82]. Dans un article publié dans *Dr. Dobb's Journal* (avril, 1997), Price et Storn décrivent la DE ainsi :

"... Differential Evolution (DE), however, is an exceptionally simple ES<sup>†</sup> that promises to make fast and robust numerical optimization accessible to everyone. Remarkably, DE's main search engine can be easily written in less than 20 lines of C code and involves nothing more exotic than a uniform random-number generator and a few floating-point arithmetic operations." [73]

Le schéma décrit ci-dessus est la stratégie la plus utilisée de la DE. Storn et Price propose plusieurs autres variantes qu'ils classifient selon la notation [72, 74, 79] :

$$DE/x/y/z \quad [2 - 60] \triangleleft$$

où

- $x$  spécifie la manière de choisir le vecteur *base* qui peut être *rand* (*random* : un choix aléatoire), *best* (le vecteur correspondant au minimum courant de la population) ou *target-to-best* (le vecteur *base* est le *target* avec une perturbation supplémentaire avec la différence (*best - target*) (l'équation 2-63)),
- $y$  dénote le nombre de différences de vecteurs utilisés pour perturber le vecteur *base*
- et  $z$  dénote le schéma du croisement (*crossover*) qui peut être *bin* (binomial) ou *exp* (exponentiel).

Avec cette notation, le schéma décrit par l'équation 2-57 est dénoté *DE/rand/1/bin* :

- le vecteur *base* est choisis aléatoirement (*rand*),
- on utilise une seule différences de vecteurs (1) pour perturber le vecteur *base*
- et le croisement est binomial (*bin*).

Les schémas les plus utilisés dans la littérature, en plus de *DE/rand/1/bin*, sont [72, 80–84] :

$$DE/best/1 : \quad V_{i,G} = X_{best,G} + F \cdot (X_{r_1,G} - X_{r_2,G}) \quad [2 - 61] \triangleleft$$

$$DE/best/2 : \quad V_{i,G} = X_{best,G} + F \cdot (X_{r_1,G} - X_{r_2,G}) + F \cdot (X_{r_3,G} - X_{r_4,G}) \quad [2 - 62] \triangleleft$$

†. ES : Evolution Strategy

$$\begin{aligned}
 DE/target-to-best/1 : \quad V_{i,G} &= X_{i,G} + F \cdot (X_{best,G} - X_{i,G}) + F \cdot (X_{r_1,G} - X_{r_2,G}) \quad [2 - 63] \triangleleft \\
 DE/rand/2 : \quad V_{i,G} &= X_{r_1,G} + F \cdot (X_{r_2,G} - X_{r_3,G}) + F \cdot (X_{r_4,G} - X_{r_5,G}) \quad [2 - 64] \triangleleft
 \end{aligned}$$

Bien que d'autres stratégies ont été proposées dans la littérature [79, 81, 82, 85], celles citées ci-dessus restent les plus utilisées à nos jours.

De ce qui précède, on peut voir qu'il y a uniquement quatre paramètres de contrôle de la DE :  $N_p$ ,  $CR$ ,  $F$  et la stratégie (les équation 2-57 et 2-58), qui doivent être fixés par l'utilisateur. Bien qu'il y aient des valeurs recommandées, plusieurs études ont montré que les performances de la DE sont très sensibles aux choix de ces paramètres (voir par exemple [79–90]). Ceci a poussé plusieurs auteurs à proposer des alternatives pour améliorer les performances et décharger l'utilisateur du choix des paramètres. La majorité de ces alternatives laissent  $N_p$  fixe et adaptent  $F$ ,  $CR$  et la stratégie de mutation-croisement selon l'évolution de l'algorithme (voir les articles de reviews [54, 91–95]). Dans ce qui suit, nous introduisons les principales alternatives.

### 2.3.2.2.2 Schémas Adaptés

#### Algorithme SaDE

Qin *et al.* ont proposé un algorithme DE auto-adaptatif connu dans la communauté DE par SaDE (Self-adaptive differential evolution) [83] et qu'ils ont raffiné dans [84]. Partant du fait que les performances de la DE dépendent largement de la stratégie de génération des vecteurs *trial* et des facteurs  $F$ ,  $CR$  et  $N_p$  correspondants, il est commun de procéder à un essai de toutes les stratégies disponibles pour trouver la plus appropriée (recherche *trial-and-error*), mais une telle procédure est très coûteuse en volume de calcul. Au lieu de cette approche, Qin *et al.* [83, 84] utilisent l'idée de sélectionner les paramètres de contrôle de façon probabiliste.

À cet effet, en partant d'un nombre  $K$  de stratégies candidates, ils utilisent l'historique des succès et des échecs des vecteurs *trial* générés par chaque stratégie durant les  $LP$  générations précédentes,  $LP$  étant un nombre qu'ils ont fixé à 50. Par succès, on entend la réussite du vecteur *trial* à intégrer la génération  $(G + 1)$  (l'équation 2-59). Dans ce but, une mémoire comptabilisant les succès et une mémoire comptabilisant les échecs sont maintenues comme le montre la table 2.1 :  $G$  représente la génération courante et  $ns_{k,G-g}$  et  $nf_{k,G-g}$  représentent respectivement le nombre de succès et le nombre d'échecs de la stratégie  $k$  à la génération  $G - g$ ,  $k \in [1, K]$  et  $g \in [1, LP]$ . Une phase d'apprentissage est alors nécessaire. À chaque génération  $G$ , une probabilité  $p_{k,G}$  est affectée à chaque stratégie candidate selon son historique d'échecs et de succès [84] :

**Table 2.1** — Structure de la mémoire des succès et de la mémoire des échecs [84]

<b>Mémoire des succès</b>				
<b>Indice</b>	<b>Stratégie 1</b>	<b>Stratégie 2</b>	...	<b>Stratégie K</b>
<b>1</b>	$ns_{1,G-LP}$	$ns_{2,G-LP}$	...	$ns_{K,G-LP}$
<b>2</b>	$ns_{1,G-LP+1}$	$ns_{2,G-LP+1}$	...	$ns_{K,G-LP+1}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
<b>LP</b>	$ns_{1,G-1}$	$ns_{2,G-1}$	...	$ns_{K,G-1}$

<b>Mémoire des échecs</b>				
<b>Indice</b>	<b>Stratégie 1</b>	<b>Stratégie 2</b>	...	<b>Stratégie K</b>
<b>1</b>	$nf_{1,G-LP}$	$nf_{2,G-LP}$	...	$nf_{K,G-LP}$
<b>2</b>	$nf_{1,G-LP+1}$	$nf_{2,G-LP+1}$	...	$nf_{K,G-LP+1}$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
<b>LP</b>	$nf_{1,G-1}$	$nf_{2,G-1}$	...	$nf_{K,G-1}$

$$p_{k,G} = \frac{S_{k,G}}{\sum_{k=1}^K S_{k,G}}$$

où

[2 – 65]◀

$$S_{k,G} = \frac{\sum_{g=G-LP}^{G-1} ns_{k,g}}{\sum_{g=G-LP}^{G-1} ns_{k,g} + \sum_{g=G-LP}^{G-1} nf_{k,g}} + \varepsilon$$

$\varepsilon$ , ( $= 0.01$ ), est un nombre très petit introduit pour éviter la division par zéro. Une fois les probabilités calculées, la méthode de sélection universelle stochastique [96] (**SUS** : *Stochastic Universal Selection*) permet de sélectionner la stratégie à appliquer à chaque vecteur *target*.

Pour les autres paramètres,  $N_p$  est pris constant et la valeur de  $F$  est tirée aléatoirement à chaque itération selon une loi gaussienne  $N(0.5, 0.3)$ . Une plus grande attention est donnée à  $CR$  : sa valeur est tirée aléatoirement à chaque itération pour chaque vecteur *trial* selon une loi gaussienne  $N(CRm_k, 0.1)$ . Pour chaque stratégie  $k$ , une mémoire  $CRMemory_k$  de taille  $LP$ , stocke les valeurs des  $CR$  ayant généré des vecteurs *trial* qui ont réussi à entrer dans la génération suivante.  $CRm_k$  est alors la valeur médiane des  $CR_k$  correspondants.

Qin *et al.* [84] ont considéré 4 stratégies ( $K = 4$ ) : *DE/rand/1/bin* (équation 2-57), *DE/rand/2/bin* (équation 2-64), *DE/rand-to-best/2/bin* (équation 2-66) et *DE/curr-to-rand/1* (équation 2-67).

$$\begin{aligned} \text{DE/rand-to-best/2/bin} : \quad V_{i,G} = & X_{i,G} + F \cdot (X_{best,G} - X_{i,G}) \\ & + F \cdot (X_{r_1,G} - X_{r_2,G} + X_{r_3,G} - X_{r_4,G}) \end{aligned} \quad [2 - 66] \triangleleft$$

$$\text{DE/curr-to-rand/1} : \quad V_{i,G} = X_{i,G} + F \cdot (X_{r_1,G} - X_{i,G}) + F \cdot (X_{r_2,G} - X_{r_3,G}) \quad [2 - 67] \triangleleft$$

Finalement, on note que pendant la phase d'apprentissage toutes les stratégies sont équiprobables,  $p_k = 1/K$  et  $CR_m$  est fixé à 0.5.

### Algorithme jDE

Brest *et al.* ont proposé [97] un schéma adaptatif, connue sous le nom **jDE**, qui permet de contrôler les paramètres  $F$  et  $CR$  selon les équations suivantes :

$$F_{i,G+1} = \begin{cases} F_l + \text{rand}_1 \cdot F_u, & \text{si } \text{rand}_2 < \tau_1 \\ F_{i,G}, & \text{sinon} \end{cases} \quad [2 - 68] \triangleleft$$

$$CR_{i,G+1} = \begin{cases} \text{rand}_3, & \text{si } \text{rand}_4 < \tau_2 \\ CR_{i,G}, & \text{sinon} \end{cases} \quad [2 - 69] \triangleleft$$

où  $\text{rand}_j$ ,  $j \in 1, 2, 3, 4$ , sont des nombres aléatoires uniformes  $\in [0, 1]$ ,  $\tau_1$  et  $\tau_2$  sont respectivement les probabilités d'ajustement de  $F$  et  $CR$ , et  $F_l$  et  $F_u$  sont introduit pour limiter  $F$  dans un intervalle donné. Brest *et al.* [97] ont proposé les valeurs  $\tau_1 = \tau_2 = 0.1$ ,  $F_l = 0.1$  et  $F_u = 0.9$  pour limiter  $F$  dans l'intervalle  $[0.1, 1.0]$ .

On note que, si on adopte les valeurs proposées par Brest *et al.*, aucun paramètres de contrôle n'est à spécifier.

### Algorithme JADE

Zhang et Sanderson ont proposé l'algorithme **JADE** [98,99]. C'est une méthode alternative basée sur une nouvelle stratégie qu'il nomme *DE/current-to-pbest* :

$$\text{DE/current-to-pbest/1} : \quad V_{i,G} = X_{i,G} + F_i \cdot (X_{best,G}^p - X_{i,G}) + F_i \cdot (X_{r_1,G} - X_{r_2,G}) \quad [2 - 70] \triangleleft$$

où  $X_{best,G}^p$  est choisi aléatoirement parmi les  $p\%$  meilleurs individus de la génération courante.  $F_i$  est généré indépendamment pour chaque individu à chaque itération selon le processus décrit ci-dessous.

$$F_i = \text{randc}_i(\mu_F, 0.1) \quad [2 - 71] \triangleleft$$

où  $\text{randc}_i$  est la loi de Cauchy

$$\text{randc}(x; \mu_F, a) = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{a}{(x - \mu_F)^2 + a^2} \right] \quad [2 - 72] \triangleleft$$

avec  $\mu_F$  le facteur de position et  $a$  le facteur d'échelle.  $F_i$  est tronqué à 1 si  $F_i \geq 1$  et régénéré si  $F_i \leq 0$ . Soit  $S_F$  l'ensemble des  $F_i$  qui ont eu un succès dans la génération  $G$ ,  $\mu_F$  est initialisé à 0.5 puis mis à jour à la fin de chaque génération selon la relation :

$$\mu_F = (1 - c) \cdot \mu_F + c \cdot \text{mean}_L(S_F) \quad [2 - 73] \triangleleft$$

où  $c$  est une constante  $\in [0, 1]$  et  $\text{mean}_L$  est la moyenne de Lehmer

$$\text{mean}_L = \frac{\sum_{F \in S_F} F^2}{\sum_{F \in S_F} F} \quad [2 - 74] \triangleleft$$

De façon similaire,  $CR_i$  est généré indépendamment pour chaque individu à chaque itération selon la loi gaussienne

$$CR_i = \text{randn}_i(\mu_{CR}, 0.1) \quad [2 - 75] \triangleleft$$

avec  $\mu_{CR}$  est initialisé à 0.5 puis mis à jour à la fin de chaque génération par la relation

$$\mu_{CR} = (1 - c) \cdot \mu_{CR} + c \cdot \text{mean}_A(S_{CR}) \quad [2 - 76] \triangleleft$$

où  $\text{mean}_A$  est la moyenne arithmétique et  $S_{CR}$  est l'ensemble des  $CR_i$  qui ont eu un succès dans la génération  $G$ .

D'autre part, Zhang et Sanderson [99] proposent une version améliorée avec archive de la stratégie de mutation :

$$DE/current-to-pbest/1 : V_{i,G} = X_{i,G} + F_i \cdot (X_{best,G}^p - X_{i,G}) + F_i \cdot (X_{r_1,G} - \tilde{X}_{r_2,G}) \quad [2 - 77] \triangleleft$$

où  $\tilde{X}_{r_2,G}$  est choisi aléatoirement de l'union  $P \cup A$ .  $P$  est la population courante et  $A$  est une archive de taille  $N_p$  qui est initialement vide, puis à chaque génération, y sont ajoutés tout les



vecteurs *trial* qui n'ont pas réussi à la sélection l'équation 2-59.

Zhang et Sanderson [99] recommandent les valeurs  $p \in [5\%, 20\%]$  et  $1/c \in [5, 20]$ .

### Algorithme SHADE

Tanabe et Fukunaga ont proposé l'algorithme SHADE (Success-History Based Parameter Adaptation for Differential Evolution) [100]. C'est amélioration à JADE qui utilise une adaptation basée sur l'historique. Au lieu de procéder par une adaptation basée sur les moyennes de  $CR$  et  $F$  calculées sur une seule génération, Tanabe et Fukunaga [100] calculent les moyennes en se basant sur l'historique des générations précédentes. Ils maintiennent une mémoire de taille  $H$  dans laquelle ils sauvegardent les moyennes  $M_{CR}$  et  $M_F$ , comme illustré sur la table 2.2. Initialement, on a ( $M_{CR,i}M_{F,i} = 0.5, i \in [1, H]$ )

À chaque génération, les paramètres  $CR_i$  et  $F_i$  utilisés pour chaque vecteur *target*  $X_i$  sont calculés par les équations :

$$CR_i = \text{randn}_i(M_{CR,r_i}, 0.1) \quad [2-78]<$$

$$F_i = \text{randc}_i(M_{F,r_i}, 0.1) \quad [2-79]<$$

où  $r_i$  est un indice sélectionné aléatoirement dans l'intervalle  $[1, H]$ .  $CR_i$  et  $F_i$  sont ajustés dans l'intervalle  $[0, 1]$  comme décrit pour la JADE.

À la fin de chaque génération,  $M_{CR}$  et  $M_F$  sont mis à jour selon le procédé suivant :

$$M_{CR,k,G+1} = \begin{cases} \text{mean}_{WA}(S_{CR}), & \text{si } S_{CR} \neq \emptyset \\ M_{CR,k,G}, & \text{sinon} \end{cases} \quad [2-80]<$$

$$M_{F,k,G+1} = \begin{cases} \text{mean}_{WL}(S_F), & \text{si } S_F \neq \emptyset \\ M_{F,k,G}, & \text{sinon} \end{cases} \quad [2-81]<$$

où l'indice  $k (\in [1, H])$  détermine la position à mettre à jour dans la mémoire. À l'initialisation, on a  $k = 1$ , puis  $k$  est incrémenté chaque fois qu'un nouveau élément est inséré. Lorsque  $k$  devient  $> H$ , on le remet à 1. Le symbole  $\emptyset$  dans les équation 2-80 et 2-81 veut dire qu'aucun vecteur *trial* n'a réussi à rejoindre la génération  $G + 1$ .

La moyenne arithmétique pondérée  $\text{mean}_{WA}$  et la moyenne de Lehmer sont calculées par

**Table 2.2** — Structure de la mémoire de l'historique  $M_{CR}, M_F$  [100]

Indice	1	2	...	$H-1$	$H$
$M_{CR}$	$M_{CR,1}$	$M_{CR,2}$	...	$M_{CR,H-1}$	$M_{CR,H}$
$M_F$	$M_{F,1}$	$M_{F,2}$	...	$M_{F,H-1}$	$M_{F,H}$

les équations suivantes :

$$\text{mean}_{w_A}(S_{CR}) = \sum_{k=1}^{\|S_{CR}\|} w_k \cdot S_{CR,k} \quad [2 - 82] \triangleleft$$

$$\text{mean}_{w_L}(S_{CR}) = \frac{w_k \cdot \sum_{k=1}^{\|S_{CR}\|}}{w_k \cdot \sum_{k=1}^{\|S_{CR}\|} F} \quad [2 - 83] \triangleleft$$

$$w_k = \frac{\Delta f_k}{\sum_{k=1}^{\|S_{CR}\|} \Delta f_k} \quad [2 - 84] \triangleleft$$

où  $\|S_{CR}\|$  est le nombre d'éléments dans la mémoire  $S_{CR}$  et  $\Delta f_k = |\text{Obj}(U_{k,G}) - \text{Obj}(X_{k,G})|$ .

**SHADE** utilise la stratégie *DE/Current-to-pbest/1* (l'équation 2-70). Au lieu de prendre une probabilité statique comme pour la **JADE**, on associe une probabilité  $p_i$  à chaque vecteur *target* selon la loi aléatoire uniforme

$$p_i = \text{rand}(p_{min}, 0.2) \quad [2 - 85] \triangleleft$$

où  $p_{min}$  ne peut être inférieur à  $2/N_p$ , de sorte à avoir au moins deux vecteurs *pBest*. On note à la fin que la valeur recommandée pour  $H$  est 100.

### 2.3.2.3 Particle Swarm Optimization

L'optimisation par essaim de particules **PSO** (Particle Swarm Optimization) est une métaheuristique basée sur la population qui appartient à la catégorie de l'intelligence en essaim (**SI** Swarm Intelligence). Il a été proposée par Kennedy et Eberhart en 1995 [101] et s'inspire du comportement social des oiseaux en quête de nourriture : lorsque le groupe d'oiseaux est en vol, il favorise la coopération plutôt que la compétition. Kennedy et Eberhart en 1995 [101] ont appuyé ce concept par les affirmations du sociobiologiste E. O. Wilson :

*"In theory at least, individual members of the school can profit from the discoveries and previous experience of all other members of the school during the*

*search for food. ... It can become decisive, outweighing the disadvantages of competition for food items, whenever the resource is unpredictably distributed in patches.*" [102, p. 442]

En d'autres termes, durant la recherche de la nourriture, les oiseaux peuvent profiter des découvertes et de l'expérience de tous les autres membres du groupe. Le comportement du groupe est régi par une règle d'interaction entre les membres :

- chaque membre cherche à rester avec l'autre,
- chaque membre garde une distance de sécurité avec son voisinage
- et chaque membre est attiré par les sources de nourriture. Ceci le pousse à quitter le groupe et pousse les membres voisins à le suivre. Une boucle de réaction fera que le reste du groupe les suivra.

Kennedy et Eberhart en 1995 [101] ont établi l'algorithme **PSO** en considérant une population (essaim) de  $N_p$  particules  $X_i$ . Chaque particule, à un instant  $t$ , possède les caractéristiques suivantes :

- Elle a une position  $x_i$  et une vitesse  $v_i$  aléatoires.
- Elle connaît la meilleure position  $x_i^{Best}$  par laquelle elle est passée.
- Elle connaît la meilleure position  $x^{Global}$  connue de son voisinage.

Ceci dit, la position et la vitesse sont mis à jour comme suit [103] :

$$\begin{aligned} x_{i,t+1} &= x_{i,t} + v_{i,t} \\ v_{i,t+1} &= w \cdot v_{i,t} + C_1 \cdot \text{rand}(0,1) \cdot (x_{i,t}^{Best} - x_{i,t}) \\ &\quad + C_2 \cdot \text{rand}(0,1) \cdot (x_t^{Global} - x_{i,t}) \end{aligned} \quad [2 - 86] \triangleleft$$

où  $t$  représente l'itération (temps) actuelle,  $w$  est le poids d'inertie ( $w \in [0.9, 1.2]$ ), généralement pris ( $= 1$ ),  $C_1$  et  $C_2$  sont respectivement les coefficients d'accélération *cognitive* et *social*, et  $\text{rand}_1(a, b)$  et  $\text{rand}_2(a, b)$  sont des nombres aléatoires uniformes entre  $a$  et  $b$ .

En raison de sa mise en oeuvre facile, de sa robustesse et de son efficacité, le **PSO** a attiré beaucoup d'attention et a été utilisé dans beaucoup de domaines. Il existe plusieurs variantes du **PSO** qu'on n'a pas utilisés dans ce travail [103].

## 2.4 Applications et Commentaires

Dans cette partie, on utilise les méthodes décrites dans les paragraphes précédents pour extraire les paramètres **SDM** et **DDM** de la **SC** et du **SP** les plus utilisés comme benchmark dans

la littérature [14] : une **SC** au silicium cristallin de 57 mm de diamètre de RTC France fonctionnant à 33 °C. et un **SP** (Photowatt-PWP 201) dans lequel 36 cellules en silicium polycristallin sont connectées en série fonctionnant à 45 °C. Les méthodes considérées ont été implantées dans différents langages et environnement de programmation :

- Les méthodes non-itératives de Nehaoua [48] et de Ortiz-Conde [104] ont été implantées en langage Python [105].
- Deux versions des **GAs** ont été implantées : l'une (**mSGA**) avec le toolbox libre GAOT GAOT [106] sous l'environnement *Matlab* [107] et l'autre (**cSGA**) par le toolbox C++ GAlib [108, 109].
- Les **VOM**, **LOM** et **PSO** en Python [105].
- Les **DE**, **SaDE**, **SHADE**, **JADE** et **jDE** en *Python* [105].
- Pour les autres, OptCond [49], SmpCond [44], An.5pt [49] et LSE [14], on a utilisé les résultats des publications originales.

Pour toutes les méthodes métaheuristiques, les réglages suivants ont été adoptés :

- Le nombre de particules a été fixé à 50 pour **DE** et ses variantes, 400 pour le **PSO** et les **GAs**.
- Le nombre de générations a été fixé à 2000
- Chaque algorithme est exécuté 10 fois. La solution optimale est sélectionnée comme étant la meilleure parmi les 10 exécutions.

Pour les **GAs**, les réglages ont été les suivants :

- Les particules sont codées avec des nombres réels.
- La sélection se fait à la roulette.
- Le croisement est uniforme pour la **mSGA** et **BXO** pour la **cSGA**.
- Les probabilités de croisement et de mutation sont respectivement 0.7 et 0.01.

Pour toutes les méthodes numériques, les fonction Objectif **RMSE** (l'équation 2-50) et  $S_i$  (**VOM**) (l'équation 2-51) ont été optimisées. À la fin, une contribution à l'extraction des paramètres **SDM** avec l'algorithme **mSGA** dans un environnement bruité sera considérée.

### 2.4.1 Modèle SDM Avec RMSE

La première application consiste à extraire les paramètres **SDM** de la **SC** et du **SP** en minimisant le **RMSE**. La table 2.3 montrent les résultats obtenus avec les neuf (9) méthodes numériques considérées. On voit que les méthodes de Newton-Rasphon (byNR), **cSGA**, **DE**, **SaDE**, **SHADE** et **jDE** trouvent le même **RMSE** avec la méthode de Parida et Rout [110] (**DEDCF**) qui est celle qui trouve les meilleurs **RMSE** pour ces deux dispositifs dans la littérature, 0.7730062 mA pour la **SC** et 2.039992 mA pour le **SP**. En plus les valeurs des paramètres sont pratiquement les mêmes (ne sont pas différents par plus de 0.1%). Les méthodes **JADE** et **PSO** trouvent des résul-

**Table 2.3** — Paramètres **SDM** de la **SC** RTC et du **SP** PWP201 extraits par différentes méthodes en minimisant le **RMSE**

Méthode	$I_{ph}$ (A)	$I_s$ ( $\mu A$ )	$n$	$R_s$ ( $m\Omega$ )	$G_p$ ( $m\Omega^{-1}$ )	$RMSE$ ( $\times 10^{-4}$ )	$\sigma$ (%)
<b>Cellule Solaire RTC France à 33 °C</b>							
byNR	0.76079	0.31068	1.4773	36.547	18.907	7.730062	1.4090
mSGA	0.76198	0.32155	1.4806	36.106	22.416	8.540392	1.1067
cSGA	0.76079	0.31068	1.4780	36.547	18.907	7.730062	1.4090
DE	0.76079	0.31068	1.4780	36.547	18.907	7.730062	1.4090
SaDE	0.76079	0.31068	1.4780	36.547	18.907	7.730062	1.4090
SHADE	0.76079	0.31068	1.4780	36.547	18.907	7.730062	1.4090
jDE	0.76079	0.31068	1.4773	36.547	18.907	7.730062	1.4090
JADE	0.76078	0.31317	1.4788	36.520	18.767	7.732960	1.4785
PSO	0.76078	0.31307	1.4780	36.514	18.844	7.730980	1.4259
DEDCE [110]	0.76079	0.31068	1.4767	36.546	18.907	7.730062	
<b>Module Solaire PWP201 à 45 °C</b>							
byNR	1.03235	2.49660	47.421	1240.5	1.3363	20.39992	1.6323
mSGA	1.03160	3.32433	48.497	1206.8	1.13608	21.32944	0.80635
cSGA	1.03235	2.49660	47.421	1240.5	1.3363	20.39992	1.6323
DE	1.03235	2.49660	47.421	1240.5	1.3363	20.39992	1.6323
SaDE	1.03235	2.49660	47.421	1240.5	1.3363	20.39992	1.6323
SHADE	1.03235	2.49660	47.421	1240.5	1.3363	20.39992	1.6323
jDE	1.03235	2.49660	47.421	1240.5	1.3363	20.39992	1.6323
JADE	1.03242	2.49593	47.421	1239.9	1.3495	20.40635	1.5391
PSO	1.03220	2.6473	47.636	1233.7	1.2964	20.40635	1.4534
DEDCE [110]	1.03143	2.6381	47.598	1235.6	1.2171	20.5296	

tats très proches des précédents alors que la **mSGA** trouvent des résultats très éloignés (cependant ils sont considérés acceptables). La différence essentielle entre ces méthodes est la fiabilité : les premières citées (**cSGA**, **DE**, **SaDE**, **SHADE** et **jDE**) reproduisent les mêmes résultats dans chacune des 10 exécutions (les **RMSEs** ne sont pas différents par plus de  $10^{-13}$  d'une exécution à une autre), alors que pour les 3 dernières (**mSGA**, **JADE** et **PSO**) les résultats sont les meilleurs parmi 10 exécutions (de grandes variations existent d'une exécution à une autre). La **table 2.3**

montre aussi le critère de mesure

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (I_{cal,i}/I_{ex,i} - 1)^2}{N}} \quad [2 - 87] \triangleleft$$

utilisé dans plusieurs travaux (par exemple dans [49]). On voit qu'il est inférieur à 1.7 % pour les deux dispositifs.

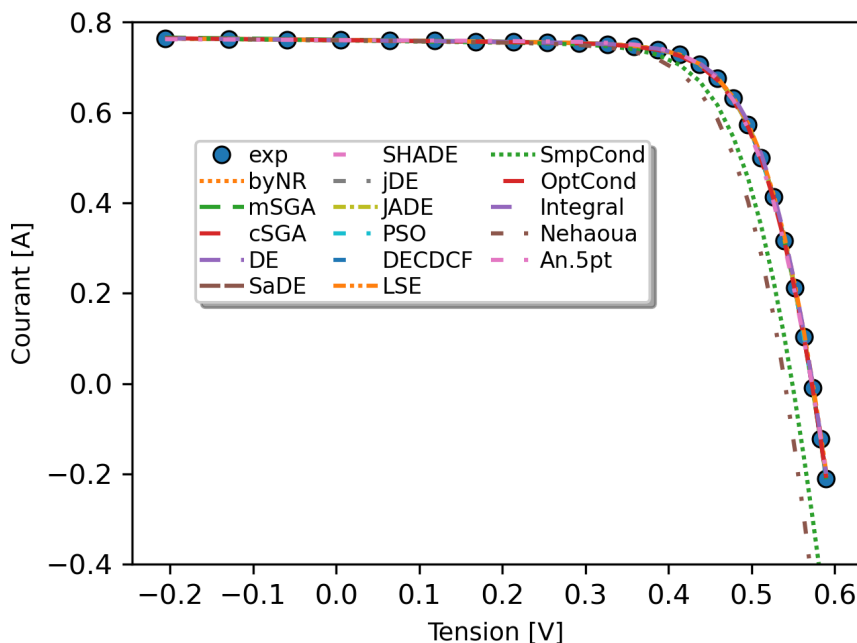


Figure 2.3 — COURBE EXPÉRIMENTALE ET COURBES SIMULÉES DE LA SC RTC FRANCE.

Les figures 2.3 et les figures 2.4 montrent les très bons *fittings* obtenus pour respectivement la SC et le SP avec les méthodes numériques.

## 2.4.2 Modèle SDM Avec VOM

La deuxième application consiste à extraire les paramètres SDM de la SC et du SP en minimisant le VOM ( $S_I$ ). La table 2.4 montrent les résultats obtenus avec les onze (11) méthodes considérées (neuf (9) numériques et deux (2) non-itératives). On voit que les méthodes numériques donnent des résultats de très loin meilleurs que toutes les méthodes non-itératives, celles considérées dans ce travail (Nehaoua [48] et Integral [51]) et celles prises à titre comparatif (LSE [14], OptCond [49], SmpCond [44] et An.5pt [49]).

De même que pour le cas de l'optimisation du RMSE, les méthodes de Newton-Raphson (byNR), cSGA, DE, SaDE, SHADE et jDE trouvent les mêmes valeurs de  $\sigma$ , 0.43959 % pour la SC et 0.50505 % pour le SP, et pratiquement les mêmes valeurs des paramètres (ne sont pas

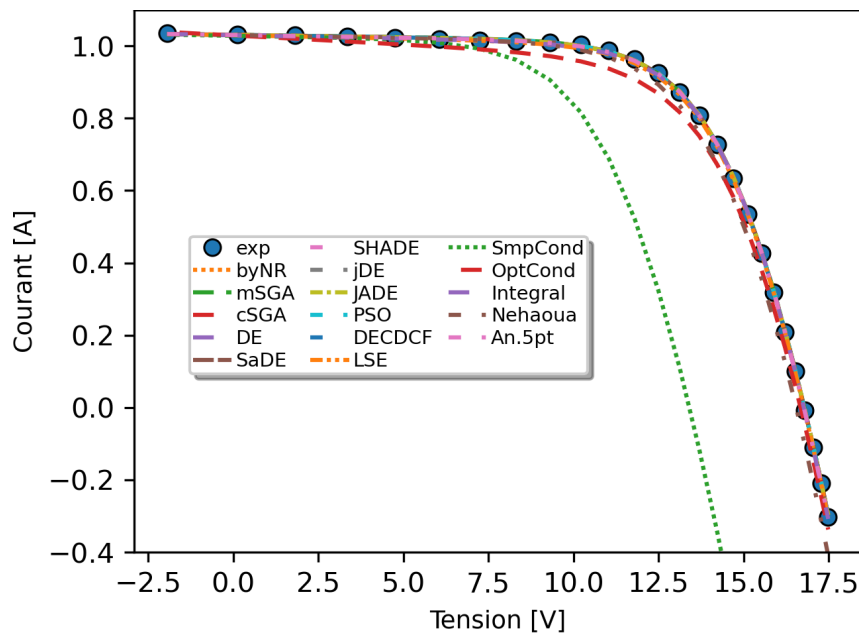


Figure 2.4 — COURBE EXPÉRIMENTALE ET COURBES SIMULÉES DU SP PWP201

différents par plus de 0.1%). Les méthodes **JADE** et **PSO** trouvent des résultats très proches des précédents alors que la **mSGA** trouvent des résultats très éloignés (cependant ils sont acceptables). On note la même remarque pour la fiabilité : les premières méthodes citées (**cSGA**, **DE**, **SaDE**, **SHADE** et **jDE**) reproduisent les mêmes résultats dans chacune des 10 exécutions (les **RMSEs** ne sont pas différents de plus de  $10^{-13}$  d'une exécution à une autre), alors que pour les 3 dernières (**mSGA**, **JADE** et **PSO**) les résultats sont les meilleurs parmi 10 exécutions (de grandes variations existent d'une exécution à une autre).

Les figures 2.3 et les figures 2.4 montrent les  *fittings*  obtenus avec toutes les méthodes considérées. Tous sont bons sauf la **SmpCond**, **OptCond** et **Nehaoua**.

La comparaison entre La table 2.3 et la table 2.4 montre clairement la différence entre les valeurs des paramètres obtenus par les deux fonctions Objectifs, sachant que celles de  $I_{ph}$  sont très voisines. Si les différences entre les valeurs de  $R_s$  et  $G_p$  peuvent être attribuées aux tolérances de calculs, celles de  $n$  et surtout  $I_s$  qui dépassent les 50 % ne peuvent être négligées. Cet aspect n'a pas été considéré dans ce travail et mérite une étude plus approfondie.

Ces deux premières applications permettent de tirer trois importantes conclusions

- Les méthodes numériques surclassent de très loin les méthodes non-itératives.
- L'obtention d'un bon  *fitting*  n'implique pas l'obtention de bons paramètres.
- Les valeurs des paramètres peuvent largement varier selon la fonction objectif.

### 2.4.3 Modèle DDM Avec RMSE

La troisième application consiste à extraire les paramètres **DDM** de la **SC** en minimisant le **RMSE**. La table 2.5 montrent les résultats obtenus avec les neuf (9) méthodes numériques considérées. On voit que les méthodes numériques donnent des résultats de très loin meilleurs que la méthode de Parida et Rout [110] (**DEDCF**) qui est celle qui trouve les meilleurs **RMSE** pour cette cellule dans la littérature 0.7419648 mA. Les méthodes de Newton-Rasphon (byNR), **cSGA**, **DE**, **SaDE**, **SHADE** et **jDE** trouvent un **RMSE** de 0.6915396 mA.

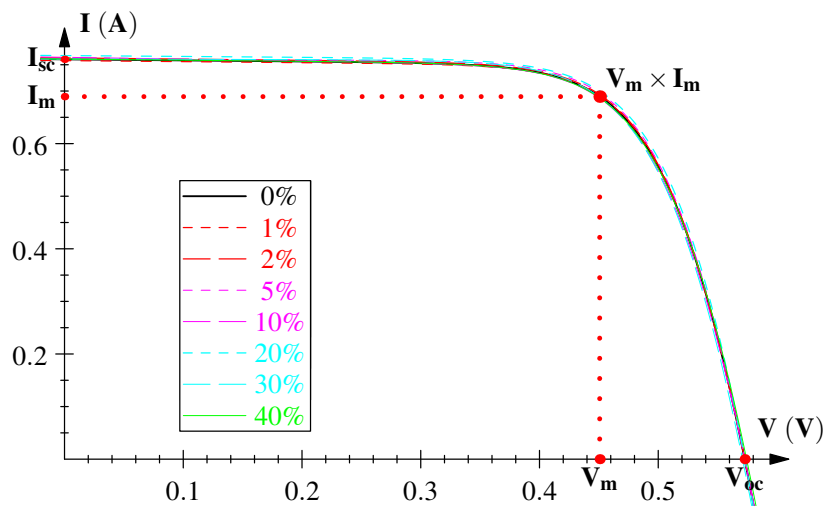
On fait les mêmes observations et les même remarques de fiabilité et de convergence des méthodes que les deux applications précédentes. Ce qui est remarquable est la valeur très élevée de  $n_2$  (7.1757), une valeur  $> 2$  très peu rencontré dans la littérature. Bien que telle, cette valeur est possible en théorie, dans le cas des diodes de garde utilisées dans les process de fabrication.

### 2.4.4 Données Bruitées

La quatrième application considérée est l'extraction des paramètres **SDM** de la **SC** et du **SP** en ajoutant aux données expérimental un bruit uniforme simulé selon l'expression suivante :

$$I_{noisy} = I_{exp} \times (1 + p) \quad [2 - 88] \triangleleft$$

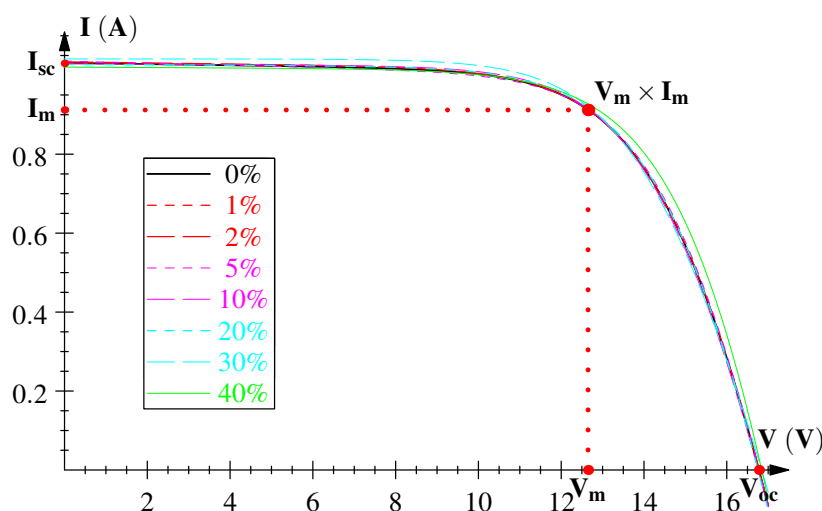
où  $p$  est le niveau du bruit, entre 0 et 40 %,  $I_{exp}$  est le courant expérimental et  $I_{noisy}$  est le courant bruité.



**Figure 2.5** — I-V CARACTÉRISTIQUES DE LA CELLULE SOLAIRE GÉNÉRÉES À PARTIR DES PARAMÈTRES EXTRAITS POUR DIFFÉRENTS NIVEAUX DE BRUIT. LES DONNÉES EXPÉRIMENTALES CORRESPONDENT À UN NIVEAU DE BRUIT DE 0 %.

Les paramètres ont été extraits pour chaque niveau de bruit (jusqu'à 40%) avec la méthode





**Figure 2.6** — IV CARACTÉRISTIQUES DE LA CELLULE SOLAIRE GÉNÉRÉES À PARTIR DES PARAMÈTRES EXTRAITS POUR DIFFÉRENTS NIVEAUX DE BRUIT. LES DONNÉES EXPÉRIMENTALES CORRESPONDENT À UN NIVEAU DE BRUIT DE 0 %.

mSGA et les caractéristiques  $I-V$  ont été générées et tracées dans les figures 2.5 et 2.6 pour respectivement la SC et le SP. Compte tenu du niveau de bruit élevé, il est évident que le *fitting* obtenu peut être considéré comme bon.

Il faut souligner que le point de puissance maximum correspondant à  $V_m$  et  $I_m$  est approximé avec une très bonne précision pour les niveaux de bruit considérés. Une telle remarque est importante pour des algorithmes comme MPPT qui suivent le point de puissance maximale d'une cellule solaire. Cela garantit que l'on peut suivre le point de puissance maximum même dans un environnement très bruité. Nous avons également souligné que  $I_{ph}$ ,  $R_s$  et  $n$  sont trouvés avec une très bonne précision pour tous les niveaux de bruit.

L'idée initiale était d'étudier la variation des paramètres extraits en fonction du niveau de bruit et de la taille de la population. Malheureusement, la version *Matlab* des GAs s'avéra très lente. On a été appelé de chercher une version plus rapide, ce qui nous a conduit vers la librairie C++ GALib [108, 109]. Après quelques modifications, nous avons obtenu les résultats qu'on exposera dans le chapitre suivant.

## 2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons introduit quelques unes des méthodes non-itératives d'extraction des paramètres des dispositifs PVs les plus utilisées dans la littérature et les trois algorithmes métaheuristiques les plus connus : GAs, DE et PSO. Nous avons montré ce qui suit :

- Les algorithmes métaheuristiques surclassent largement les algorithmes non-itératifs.

- En considérant deux fonctions objectif différentes, on peut obtenir des valeurs différentes des paramètres.
- Les **GAs** peuvent être utilisés efficacement pour extraire les paramètres de données bruitées.

Dans les chapitre suivants, nous explorerons plus profondément ce dernier point.

**Table 2.4** — Paramètres **SDM** de la **SC** RTC et du **SP** PWP201 extraits par différentes méthodes en minimisant le  $S_I$ 

Méthode	$I_{ph}$ (A)	$I_s$ ( $\mu A$ )	$n$	$R_s$ ( $m\Omega$ )	$G_p$ ( $m\Omega^{-1}$ )	$RMSE$ ( $\times 10^{-4}$ )	$\sigma$ (%)
<b>Cellule Solaire RTC France à 33 °C</b>							
<b>LSE</b> [14,111]	0.7608	0.3223	1.4837	36.4	18.6		1.4743
<b>OptCond</b> [49, 111]	0.7608	0.4039	1.5039	36.4	20.2		1.0359
<b>SmpCond</b> [44, 111]	0.7603	0.46	1.456	38.5	23.86		8.4973
<b>Integral</b> [112]	0.76088	0.2551	1.460	36.233	18.908		0.6002
<b>Nehaoua</b> [112]	0.7605	2.0333	1.5985	29.537	2.3860		9.2803
<b>An.5pt</b> [49,111]	0.7606	0.2417	1.4513	42.2	9.4		2.1549
<b>byNR</b>	0.76087	0.24375	1.4540	37.377	20.925	9.050485	0.43959
<b>mSGA</b>	0.76198	0.32155	1.4806	36.106	22.416	8.540392	1.1067
<b>cSGA</b>	0.76087	0.24375	1.4540	37.377	20.925	9.050485	0.43959
<b>DE</b>	0.76087	0.24375	1.4540	37.377	20.925	9.050485	0.43959
<b>SaDE</b>	0.76087	0.24375	1.4540	37.377	20.925	9.050485	0.43959
<b>SHADE</b>	0.76087	0.24375	1.4540	37.377	20.925	9.050485	0.43959
<b>jDE</b>	0.76087	0.24375	1.4540	37.377	20.925	9.050485	0.43959
<b>JADE</b>	0.75994	0.87231	1.5882	32.994	24.980	25.7477	0.65534
<b>PSO</b>	0.77153	0.97841	1.6000	33.704	4.571	93.08388	1.3154
<b>Module Solaire PWP201 à 45 °C</b>							
<b>LSE</b> [14,112]	1.0318	3.2876	48.450	1205.7	1.82		0.7805
<b>SmpCond</b> [44, 112]	1.03	46	48.93	1229.3	1.45		5.312
<b>OptCond</b> [49, 111]	1.035	6.77	51.32	1146.3	5		8.4973
<b>Integral</b> [112]	1.03194	2.59349	47.5573	1192.6	1.83617		0.9218
<b>Nehaoua</b> [112]	1.03164	9.86555	52.3319	1105.7	1.4511		2.36394
<b>An.5pt</b> [49,111]	1.0320	2.5908	47.533	1222.6	1.45		1.8428
<b>byNR</b>	1.03159	3.96013	49.172	1175.9	1.1130	23.42319	0.50505
<b>mSGA</b>	1.03160	3.32433	48.497	1206.8	1.13608	21.32944	0.80635
<b>cSGA</b>	1.03159	3.96013	49.172	1175.9	1.1130	23.42319	0.50505
<b>DE</b>	1.03159	3.96013	49.172	1175.9	1.1130	23.42319	0.50505
<b>SaDE</b>	1.03159	3.96013	49.172	1175.9	1.1130	23.42319	0.50505
<b>SHADE</b>	1.03159	3.96013	49.172	1175.9	1.1130	23.42319	0.50505
<b>jDE</b>	1.03159	3.96013	49.172	1175.9	1.1130	23.42319	0.50505
<b>JADE</b>	1.03503	2.88586	58.383	942.30	1.3495	81.10711	1.1360
<b>PSO</b>	1.03199	3.6431	48.850	1183.5	1.2132	23.09129	0.50608

**Table 2.5** — Paramètres DDM de la SC RTC extraits par différentes méthodes en minimisant le RMSE

Méthode	$I_{ph}$ (A)	$I_{s1}$ ( $\mu A$ )	$n_1$	$I_{s2}$ ( $\mu A$ )	$n_2$	$R_s$ ( $m\Omega$ )	$G_p$ ( $m\Omega^{-1}$ )	RMSE ( $\times 10^{-4}$ )	$\sigma$ (%)
<b>Cellule Solaire RTC France à 33 °C</b>									
<b>byNR</b>	0.76097	0.21754	1.4439	606.95	7.1757	37.499	11.553	6.915396	1.0516
<b>mSGA</b>	0.76097	0.20708	1.4394	415.81	6.2526	37.615	12.191	6.920256	1.0112
<b>cSGA</b>	0.76097	0.21754	1.4439	606.95	7.1757	37.499	11.553	6.915396	1.0516
<b>DE</b>	0.76097	0.21754	1.4439	606.95	7.1757	37.499	11.553	6.915396	1.0516
<b>SaDE</b>	0.76097	0.21754	1.4439	606.95	7.1757	37.499	11.553	6.915396	1.0516
<b>SHADE</b>	0.76097	0.21754	1.4439	606.95	7.1757	37.499	11.553	6.915396	1.0516
<b>jDE</b>	0.76097	0.21754	1.4439	606.95	7.1757	37.499	11.553	6.915396	1.0516
<b>JADE</b>	0.76096	0.21372	1.4422	400.47	6.4049	37.566	12.898	6.930698	0.9903
<b>PSO</b>	0.76098	0.21709	1.4437	585.20	7.0882	37.503	11.637	6.915415	1.0505
<b>DEDCE</b> [110]	0.76081	0.06428	1.3577	0.9999	1.7870	37.805	17.737	7.419648	

# Estimation des Paramètres des Cellules Solaires par Algorithmes Génétiques dans un Environnement Bruité

\*\*\*\*\*

---

3.1	Introduction . . . . .	51
3.2	Formulation du Problème . . . . .	52
3.3	Mise au Points des GAs . . . . .	52
3.4	Procédure de Calcul . . . . .	53
3.5	Résultats et Discussions . . . . .	54
3.6	Conclusion . . . . .	65

---

## 3.1 Introduction

Dans le chapitres précédents, nous avons introduit quelques unes des méthodes les plus connues pour extraire les paramètres des **SCs** et des **SPs** et nous avons mentionné q’un très grand nombre de méthodes a été proposé à cette fin comme en témoigne les articles de revues [7–11, 25–27, 32–36]. Malgré ce grand nombre, seules quelques-unes traitent de l’effet du bruit sur la précision des paramètres extraits [5, 8–13]. Il s’agit d’un problème important, car le bruit est toujours présent dans les données mesurées et peut varier en fonction des conditions environnementales. Seuls Maouhoub *et al.* [11] et Fébba *et al.* [5], en proposant respectivement une méthode basée sur les moindres carrés et quatre méthodes basées sur des métaheuristiques, à savoir, Self-Adaptive Differential Evolution Algorithm (**jDE**) [97], Performance Guided JAYA Algorithm (**PGJAYA**) [113], Self-Adaptive Teaching-Learning-Based Optimization

Algorithm (SATLBO) [114] et Biogeo-Graph-Based Heterogeneous Cuckoo Search Algorithm (BHCS) [115], ont évalué en profondeur l'effet du bruit sur les paramètres extraits. Ces études ont examiné l'effet des niveaux de bruit de 0 % à 10 % sur chaque méthode et chaque paramètre. En plus, dans [5], les performances des méthodes ont été analysées en faisant varier la taille de la population.

Dans ce chapitre, nous analysons les effets du bruit sur la précision des paramètres SDM des SCs extraits à l'aide des GAs. Nous comparons les résultats obtenus avec trois opérateurs de croisement (XOs), les opérateurs uniforme (UXO), arithmétique (AXO) et de fusion (*blend* (BXO)), et montrons que les performances des GAs dépendent du XO choisi. Nous utilisons à cet effet, la courbe expérimentale de la SC la plus utilisée dans la littérature [14] et ses versions synthétiques et bruitées. L'effet de l'opérateur de croisement (*crossover*) sur la précision des paramètres extraits par GAs n'a pas été considéré auparavant.

## 3.2 Formulation du Problème

Le problème d'estimation des paramètres des SCs est formulé par un problème de *fitting* : trouver un vecteur  $P = (I_{ph}, I_s, n, R_s, G_p)$  tel que  $N$  données synthétiques ( $I_{s,i} - V_i$ ), générées avec l'équation 1-17, approximent le mieux les données expérimentales ( $I_{e,i} - V_i$ ). Le problème est résolu en minimisant une fonction objective (OF) qui calcule l'erreur entre les données expérimentales et synthétiques. Nous avons utilisé la racine de l'estimation quadratique moyenne (RMSE) définie par l'équation 2-50 comme OF, c'est la plus utilisée dans les problèmes de *fitting* [7–11, 25–27, 32–36].

## 3.3 Mise au Points des GAs

Les réglages (*tunning*) opérés sur les GAs ont été les suivants :

- **Codage** : le codage réel (RCGA) des individus (*chromosomes*) a été adopté. Chaque individu est un vecteur  $P$  dont les composantes (*gènes*) sont les paramètres SDM ( $I_{ph}, I_s, n, R_s, G_p$ ). Pour obtenir une bonne résolution, chaque paramètre est codé en *virgule flottante*.
- **Taille de la population** : la taille de la population a été prise comme variable dans l'intervalle [20, 20000].
- **Génération initiale** : les gènes des individus de la population initiale est générée selon une loi aléatoire uniforme.
- **Opérateurs** : les opérateurs de sélection et de mutation ont été respectivement fixés à *roulette wheel* et *Gaussian*. Étant donné qu'on considère que les GAs tirent leurs

puissances des opérateurs de croisement (*Crossover Operator* (XO)) [69, 70], trois XOs largement utilisés ont été utilisés et comparés : les opérateurs uniforme (UXO), arithmétique (AXO) et de fusion (*blend* (BXO)) [65–67, 116].

- **Probabilités** : les probabilités de croisement et de mutation ont été fixées respectivement à  $P_{mut} = 0.01$  et  $P_{cros} = 0.9$ .
- **Condition d'arrêt** : le programme doit s'arrêter, soit lorsqu'il atteint 20000 itérations (générations), soit lorsque toutes les solutions de la population se trouvaient dans un écart type prescrit de  $10^{-12}$ . Ceci permet de pousser les GAs à leurs extrêmes limites, *i.e* à un point où on est sûr qu'il n'y aura plus d'amélioration de performances.

### 3.3.1 Librairie GA Utilisée

Les GAs sont implémentés dans la plupart des langages de programmation et sur la majorité des plateformes de calcul comme programme propriétaire, tels que *Global Optimization Toolbox* (GOT) de matlab [117], ou comme software libre tel que l'implémentation matlab GAOT [106], le package Scikit-Opt de python [118], ou la class C++ GALib [108, 109].

Dans ce travail, nous avons utilisé la classe GALib. En plus d'être libre et *open source*, elle a l'avantage d'être très rapide par rapport aux implémentations Matlab ou python, et peut facilement être étendue et compilée sur plusieurs plates-formes. En plus, elle est proposée sous forme de paquet dans la distribution Debian GNU/Linux [119], qui est notre plate-forme de développement.

## 3.4 Procédure de Calcul

Les GAs ont été appliqués aux versions expérimentale et synthétique de la courbe  $I-V$  de référence (*benchmark*) la plus utilisée dans la littérature [14] : une SC au silicium cristallin de 57 mm de diamètre de RTC France fonctionnant à 33 °C. La version synthétique a été générée avec l'équation 1-17 dans l'intervalle de tension  $[0, 0.6 V]$  en utilisant les paramètres de la référence [5] reportés dans la table 3.1 avec les intervalles de recherche utilisés. Puisque les valeurs exactes sont connues, la convergence du programme et la précision des paramètres peuvent être facilement analysées.

Pour étudier l'effet du bruit sur la précision des paramètres extraits, un bruit artificiel a été ajouté à la courbe synthétique selon l'équation 3-1 ; une procédure largement utilisée dans la littérature [5, 11, 12, 52, 53, 120] :

$$I_{noisy} = I_{syn} \times (1 + p \times rand) \quad [3 - 1] \triangleleft$$

où  $I_{noisy}$  est le courant bruité,  $I_{syn}$  est le courant synthétique non-bruité,  $rand$  est un nombre aléatoire entre  $-1$  et  $+1$ , et  $p$  est le niveau du bruit à ajouter entre  $0\%$  à  $10\%$ .

Pour chaque XO considéré, les GAs ont été exécutés en faisant varier  $p$  et  $N_{pop}$ . Pour obtenir une évaluation statistique, les GAs ont été exécutées 100 fois pour chaque paire  $(p, N_{pop})$ , et à chaque exécution, la meilleure solution et les paramètres associés (RMSE,  $P$ ) ont été enregistrés. Les valeurs des paramètres correspondants au meilleur RMSE ont ensuite été sélectionnées comme solution. Deux autres quantités importantes ont également été calculées, l'erreur absolue ( $\Delta$ ) et l'erreur relative ( $\Delta_B$ ) des composantes de la solution par rapport aux valeurs exactes.

**Table 3.1** — Valeurs exactes et intervalles de recherche des paramètres utilisés dans les GAs

	$I_{ph}(A)$	$I_s(\mu A)$	$n$	$R_s(\Omega)$	$G_p(\Omega^{-1})$
<b>Exacte</b>	0.7608	0.3223	1.4808	0.0367	0.0173
<b>Minimum</b>	0.0000	0.1000	1.0000	0.0001	0.0001
<b>Maximum</b>	1.0000	1.0000	2.0000	1.0000	1.0000

## 3.5 Résultats et Discussions

### 3.5.1 Courbe Synthétique

#### 3.5.1.1 Courbe Non-Bruitée

La figure 3.1 montre le RMSE obtenu pour les 3 XOs considérés en fonction de  $N_{pop}$ . Selon Fébba *et al.* [5], un bon RMSE pour cette SC devrait être inférieur à  $9.86022 \times 10^{-4}$ , ceci est synonyme d'un bon *fitting* visuel. Ainsi, les  *fittings*  obtenus en utilisant BXO avec toutes les valeurs de  $N_{pop}$  et ceux obtenus en utilisant UXO et AXO avec  $N_{pop}$  au moins égale respectivement à 150 et 100 sont bons.

Pour UXO et AXO, le RMSE obtenu est toujours respectivement supérieur à  $2 \times 10^{-5}$  et  $2 \times 10^{-4}$  dans toute la gamme  $N_{pop}$  considérée tandis que pour BXO, il décroît rapidement pour atteindre des valeurs plus petites de plusieurs ordres de grandeur :  $5 \times 10^{-4}$ ,  $2 \times 10^{-5}$ ,  $2 \times 10^{-8}$ ,  $1 \times 10^{-13}$  et  $2 \times 10^{-16}$  pour  $N_{pop} = 20, 50, 100, 150$  et  $20000$ , respectivement.

D'autre part, on remarque que l'exécution des GAs à l'aide de BXO avec  $N_{pop} = 50$  donne des performances équivalentes à l'utilisation de UXO ou AXO avec  $N_{pop} = 20000$ . Pour une plus grande valeur de  $N_{pop}$ , BXO surpasse largement UXO et AXO. Cependant, BXO converge très lentement (en plus de 2000 itérations). En revanche, UXO et AXO effectuent entre 45 et 200 itérations pour converger. La convergence rapide vers une valeur non optimale et la lente



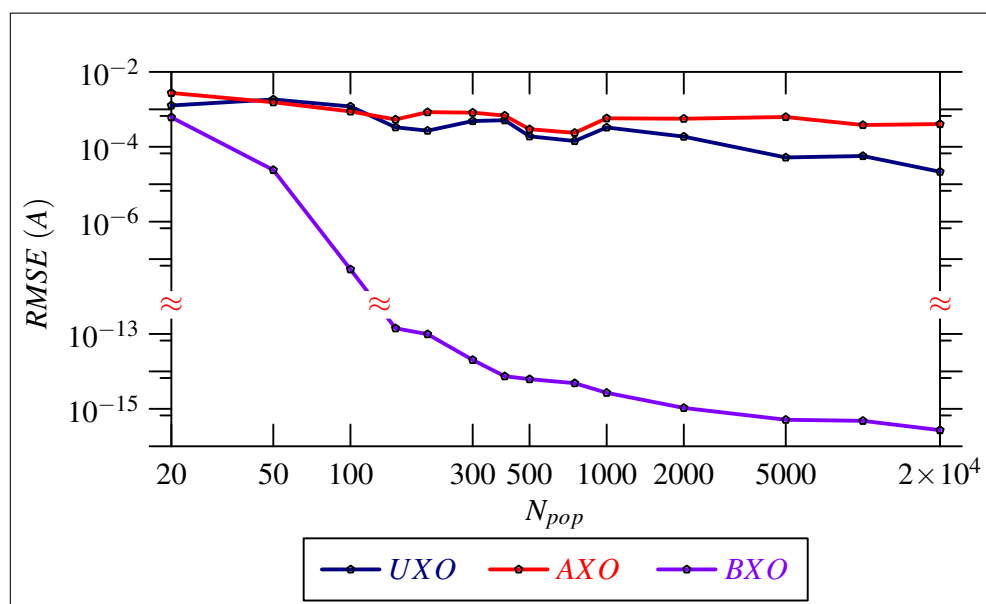


Figure 3.1 — RMSE de la courbe non-bruitée en fonction de  $N_{pop}$  pour les trois opérateurs XOs

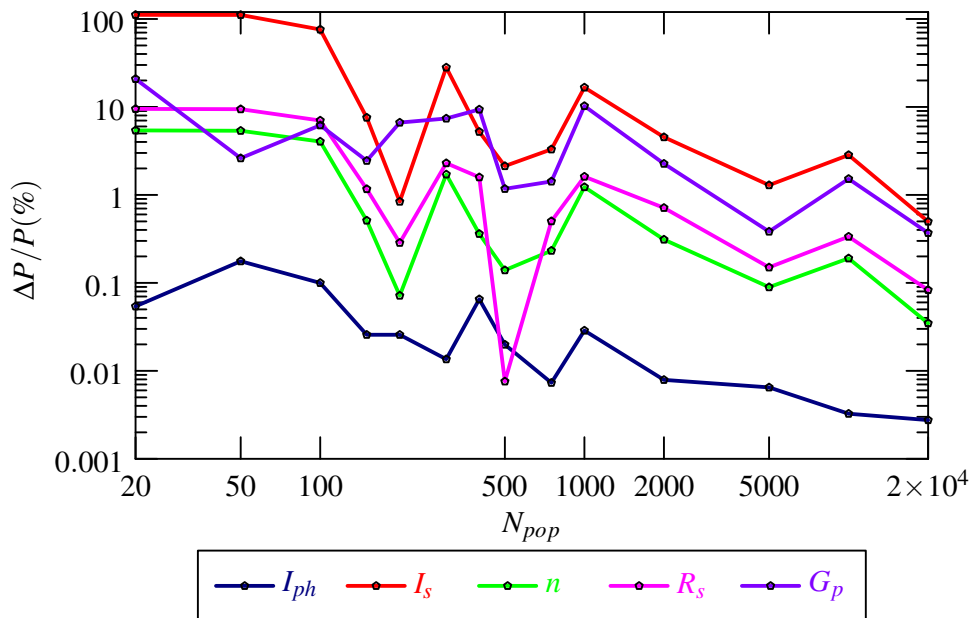
décroissance du RMSE indiquent **une convergence prématurée** que la nature de ces XOs favorisent : UXO ne crée pas de nouveaux gènes autres que ceux initialement générés, et AXO n’explore pas l’espace en dehors de celui des parents. Les itérations atteignent rapidement un état où il n’y a pas de diversité dans la population. Plusieurs techniques ont été proposées pour éviter **une convergence prématurée**, mais leurs études dépassent le cadre de ce travail.

### 3.5.1.1.1 L’opérateur UXO

La figure 3.2 montre l’erreur relative  $\Delta_B$  des paramètres extraits en fonction de  $N_{pop}$  et la lente croissance de la précision (diminution de l’erreur) lorsque  $N_{pop}$  augmente.  $I_{ph}$  est le paramètre extrait avec la plus grande précision suivi, à plus d’un ordre de grandeur, par  $n$ ,  $R_s$ ,  $G_p$  et  $I_s$ . Pour  $N_{pop}$  supérieur à 150, les erreurs sont toujours inférieures à 20%, et pour 20000, elles sont inférieures à 0.4%. Cela correspond à la région où le RMSE est inférieur à  $1 \times 10^{-3}$  %. Cette augmentation est attribuée à l’augmentation de la résolution de la population initiale. De meilleures performances peuvent être obtenues en augmentant  $N_{pop}$  au détriment d’un espace mémoire et d’un temps d’exécution énormes. Malgré ces résultats acceptables, on s’attendait à un RMSE beaucoup plus petit puisque les valeurs exactes des paramètres sont connues et les données sont non-bruitées. On s’attendait plus précisément à obtenir tous les chiffres significatifs (Significant Digit (SD)) des paramètres donnés dans la table 3.1 et utilisés pour générer la courbe en utilisant l’équation 1-17. De telles performances peuvent être facilement obtenues avec la méthode de *Newton-Raphson*. Compte tenu des valeurs et de la précision de chaque paramètre, on peut facilement montrer que pour extraire tous les SDs de chaque paramètre, les erreurs

**Table 3.2** — PARAMÈTRES DES COURBES NON-BRUITÉES ESTIMÉS EN UTILISANT UXO

$N_{pop}$	100		1000		20000	
	Valeur	$\Delta_B(\%)$	Valeur	$\Delta_B(\%)$	Valeur	$\Delta_B(\%)$
$I_{ph}(A)$	0.76156	$9.99 \times 10^{-2}$	0.76102	$2.87 \times 10^{-2}$	0.76082	$2.75 \times 10^{-3}$
$I_s(\mu A)$	0.56704	75.94	0.26864	16.65	0.32390	0.4978
$n$	1.54066	4.043	1.46262	1.228	1.48131	$3.47 \times 10^{-2}$
$R_s(\Omega)$	0.03419	7.011	0.03736	1.614	0.03673	$8.29 \times 10^{-2}$
$G_p(\Omega^{-1})$	0.01839	6.190	0.01609	10.25	0.01738	0.3698
RMSE	$1.193 \times 10^{-3}$		$3.287 \times 10^{-4}$		$2.154 \times 10^{-5}$	



**Figure 3.2** — PRÉCISIONS DES PARAMÈTRES  $SDM$  ESTIMÉS DE LA  $SC$  SYNTHÉTIQUE NON-BRUITÉE EN FONCTION DE  $N_{pop}$  POUR L'OPÉRATEUR UXO.

doivent être respectivement inférieures à  $6.5 \times 10^{-3} \%$ ,  $1.5 \times 10^{-2} \%$ ,  $3.3 \times 10^{-3} \%$ ,  $0.14 \%$  et  $0.29 \%$  pour  $I_{ph}$ ,  $I_s$ ,  $n$ ,  $R_s$  et  $G_p$ . Ainsi, chaque erreur doit être inférieure à  $3.3 \times 10^{-3} \%$  pour extraire tous les  $SDs$  des cinq (5) paramètres.

Ceci peut être vérifié dans la table 3.2 qui montre le RMSE, les paramètres extraits et les erreurs obtenues avec  $N_{pop} = 100, 1000$  et  $20000$ . La comparaison avec la table 3.1 montre que pour  $N_{pop} = 20000$ , les paramètres extraits sont proches des valeurs exactes, cependant il y a un manque de précision : bien que tous les  $SDs$  de  $I_{ph}$  et  $R_s$  aient été trouvés, il y a eu une perte de deux  $SDs$  pour  $I_s$  et  $n$ , et un pour  $G_p$ . Pour des cas plus pratiques, c'est-à-dire  $N_{pop} = 100$  et  $1000$ , tous les  $SDs$  de  $I_s$  sont perdus et deux sont perdus pour  $I_{ph}$ ,  $R_s$  et  $G_p$ . Pour  $n$ , quatre et trois

SDs sont respectivement perdus pour les valeurs de  $N_{pop} = 100$  et  $1000$ . Malgré ce manque de précision, un bon *fitting* est obtenu et tous les RMSEs pour  $N_{pop}$  supérieur à 150 sont meilleurs que la valeur de  $9.86022 \times 10^{-4}$  fixée par Fébba *et al.* [5].

Comme rapporté par Werner [43], l'obtention d'un bon *fitting*, synonyme de bon RMSE, ne prouve pas la validité des paramètres du modèle.

### 3.5.1.1.2 L'opérateur AXO

La figure 3.3 montre l'erreur relative  $\Delta_B$  des paramètres extraits en fonction de  $N_{pop}$  et la lente croissance de la précision (diminution de l'erreur) lorsque  $N_{pop}$  augmente. Comme pour UXO,  $I_{ph}$  est le paramètre extrait avec la plus grande précision suivi à plusieurs un ordres de grandeur par  $n$ ,  $R_s$ ,  $G_p$  et  $I_s$ . Les erreurs ne deviennent inférieures à 50 % que pour  $N_{pop}$  supérieur à 500. La figure 3.1 montre que le RMSE est inférieur à  $1 \times 10^{-3}$  pour  $N_{pop}$  supérieur à 100. L'effet de la convergence prématurée est plus fort et la précision des paramètres extraits est inférieure à celle de UXO.

La table 3.3 montre le RMSE, les paramètres extraits et les erreurs obtenues avec  $N_{pop} = 100, 1000$  et  $20000$ . On remarque qu'il y a un manque de précision des paramètres extraits, bien que tous les RMSEs soient acceptables : trois SDs ont été trouvés pour  $I_{ph}$ , tous les SDs de  $I_s$  ont été perdus, et seulement un a été trouvé pour les autres paramètres.

### 3.5.1.1.3 L'opérateur BXO

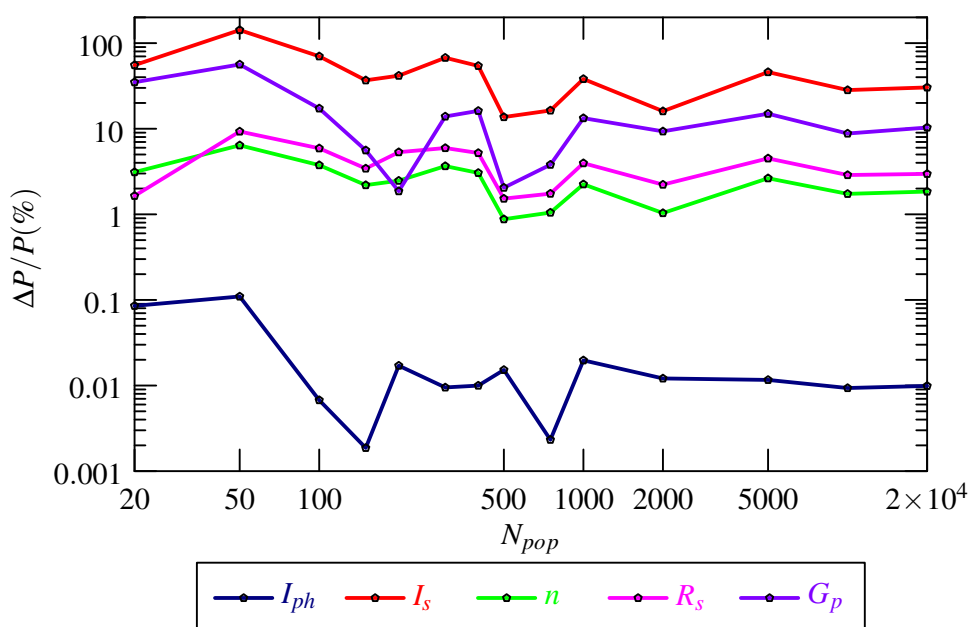
La figure 3.4 montre que l'erreur relative  $\Delta_B$  des paramètres extraits à l'aide de BXO sont inférieure à 1 % pour tous les  $N_{pop}$  considérés.  $I_{ph}$  est le paramètre extrait avec la plus grande précision : son erreur est toujours inférieure à  $1 \times 10^{-3}$  % et pour  $N_{pop}$  supérieur à 400 elle s'annule (elle est fixée à  $1 \times 10^{-15}$  % sur la figure 3.4 à cause de l'échelle logarithmique). Ce paramètre est suivi, à pas moins d'un ordre de grandeur, par  $n$ ,  $R_s$ ,  $G_p$  et  $I_s$ . La croissance de la précision est très rapide puisque  $N_{pop}$  passe de 20 à 400. L'erreur de  $I_s$  diminue de 1 % à  $1 \times 10^{-11}$  %. Lorsque  $N_{pop}$  passe de 400 à 20000, la précision augmente lentement et l'erreur de  $I_s$  diminue de  $1 \times 10^{-11}$  % à  $1 \times 10^{-13}$  %.

Les erreurs obtenues, inférieures à 1 %, montrent que pour  $N_{pop}$  aussi bas que 20, au moins un SD est trouvé pour chaque paramètre. Pour  $N_{pop} = 100$ , les erreurs absolues sont respectivement de  $1.3 \times 10^{-6}$  %,  $1.31 \times 10^{-6}$  %,  $1.88 \times 10^{-3}$  %,  $5.92 \times 10^{-4}$  %,  $2.39 \times 10^{-5}$  % et  $3.62 \times 10^{-5}$  % pour  $I_{ph}$ ,  $n$ ,  $R_s$  et  $G_p$ . Ceci correspond à une perte uniquement de deux SDs pour  $I_s$  et un de  $n$ . Pour  $N_{pop}$  supérieur ou égal à 150, tous les SDs des paramètres sont exacts dans chacune des 100 exécutions des GAs.

La table 3.4 montre les RMSE,  $\Delta$  et  $\Delta_B$  des paramètres extraits pour  $N_{pop} = 150, 1000$

**Table 3.3** — PARAMÈTRES DES COURBES NON-BRUITÉES ESTIMÉS EN UTILISANT AXO

$N_{pop}$	100		1000		20000	
	Valeur	$\Delta_B$ (%)	Valeur	$\Delta_B$ (%)	Valeur	$\Delta_B$ (%)
$I_{ph}(A)$	0.76085	$6.75 \times 10^{-3}$	0.76065	$1.97 \times 10^{-2}$	0.76072	$9.90 \times 10^{-3}$
$I_s(\mu A)$	0.54841	70.15	0.44515	38.12	0.42017	30.37
$n$	1.53643	3.7570	1.51404	2.2446	1.5081	1.845
$R_s(\Omega)$	0.03460	5.908	0.03531	3.959	0.03568	2.969
$G_p(\Omega^{-1})$	0.01433	17.27	0.01501	13.30	0.01553	10.33
RMSE	$8.780 \times 10^{-4}$		$5.766 \times 10^{-4}$		$4.047 \times 10^{-5}$	



**Figure 3.3** — PRÉCISIONS DES PARAMÈTRES SDM ESTIMÉS DE LA SC SYNTHÉTIQUE NON-BRUITÉE EN FONCTION DE  $N_{pop}$  POUR L'OPÉRATEUR AXO.

et 20000. L'erreur maximale de  $\Delta$  ( $1.14 \times 10^{-11}$ ) est à sept positions du dernier SD de  $I_s$ . Par conséquent, augmenter  $N_{pop}$  à plus de 150 n'améliore nullement la précision. on a déjà mentionné que la figure 3.1 montre que l'exécution des GAs en utilisant BXO avec  $N_{pop} = 50$  a donné des RMSEs équivalents à l'utilisation de UXO avec  $N_{pop} = 20000$ . En comparant les figures 3.2, 3.3 et 3.4, on voit que BXO avec  $N_{pop} = 150$  surpasse UXO et AXO avec toutes les valeurs de  $N_{pop}$ .

Table 3.4 — PARAMÈTRES DES COURBES NON-BRUITÉES ESTIMÉS EN UTILISANT BXO

$N_{pop}$	150		1000		20000	
	$\Delta$	$\Delta_B(\%)$	$\Delta$	$\Delta_B(\%)$	$\Delta$	$\Delta_B(\%)$
$I_{ph}(A)$	$9.4 \times 10^{-15}$	$1.2 \times 10^{-12}$	0,0000	0,0000	0,000	0,000
$I_s(\mu A)$	$1.1 \times 10^{-11}$	$3.55 \times 10^{-9}$	$6.7 \times 10^{-11}$	$2.1 \times 10^{-12}$	$5.6 \times 10^{-12}$	$1.7 \times 10^{-13}$
$n$	$3.6 \times 10^{-12}$	$2.4 \times 10^{-10}$	$2.1 \times 10^{-11}$	$1.4 \times 10^{-13}$	$1.7 \times 10^{-12}$	$1.2 \times 10^{-14}$
$R_s(\Omega)$	$1.5 \times 10^{-13}$	$4.1 \times 10^{-10}$	$8.7 \times 10^{-13}$	$2.4 \times 10^{-13}$	$7.0 \times 10^{-14}$	$1.9 \times 10^{-14}$
$G_p(\Omega^{-1})$	$2.3 \times 10^{-13}$	$1.38 \times 10^{-9}$	$1.6 \times 10^{-12}$	$9.3 \times 10^{-13}$	$1.7 \times 10^{-13}$	$1.0 \times 10^{-13}$
RMSE	$1.418 \times 10^{-10}$		$2.686 \times 10^{-15}$		$2.695 \times 10^{-16}$	

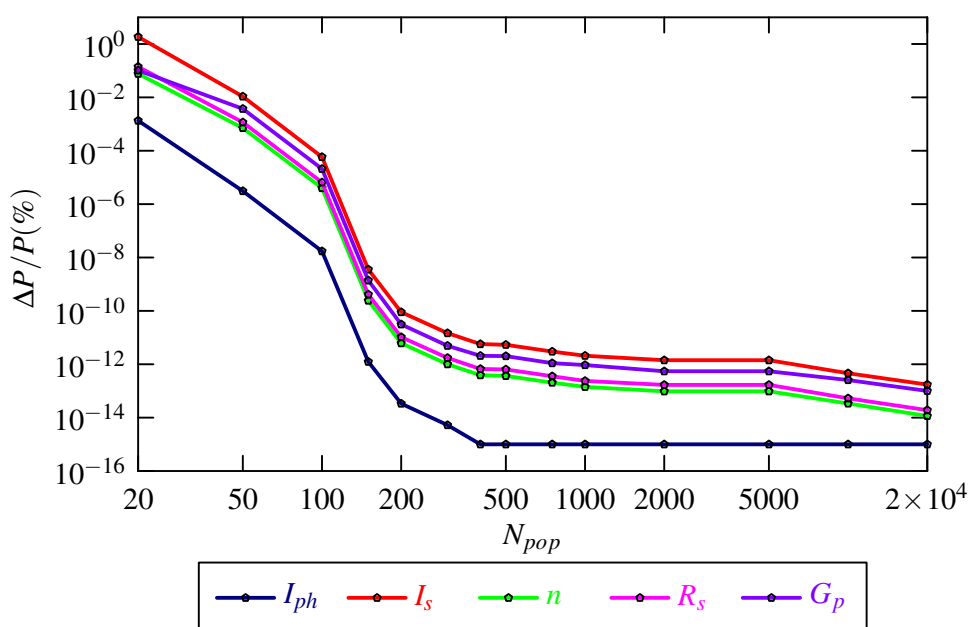


Figure 3.4 — PRÉCISIONS DES PARAMÈTRES SDM ESTIMÉS DE LA SC SYNTHÉTIQUE NON-BRUITÉE EN FONCTION DE  $N_{pop}$  POUR L'OPÉRATEUR BXO.

### 3.5.1.1.4 Commentaires

La précision des paramètres des SCs extraits par GA à partir de données non-bruitées est fortement affectée par le XO utilisé. Comme rapporté par Werner [43], l'obtention d'un bon *fitting*, synonyme de bon RMSE, ne prouve pas la validité des paramètres du modèle. L'extraction des paramètres peut avoir plusieurs objectifs :

- Si l'objectif est d'obtenir un bon *fitting*, abstraction faite de la la précision des paramètres, on peut procéder en deux étapes. D'abord, exécuter les GAs plusieurs fois soit en utilisant BXO avec un  $N_{pop}$  très faible, e. g. 20, soit en utilisant UXO ou AXO avec

- un  $N_{pop}$  faible, tel que 150. Ensuite, sélectionner la solution de la meilleure exécution comme solution optimale.
- Si l'objectif est une bonne précision ( $\Delta_B < 10\%$ ), les GAs peuvent être exécutés plusieurs fois en utilisant UXO avec  $N_{pop}$  élevé, tel que 2000, et choisir la meilleure solution.
  - Si l'objectif est une haute précision des paramètres ( $\Delta_B < 1\%$ ), les GAs peuvent être exécutés plusieurs fois en utilisant UXO avec  $N_{pop}$  très élevé, tel que 20000, et choisir la meilleure solution.
  - Pour tous les objectifs, les GAs peuvent être exécutés une seule fois à l'aide de BXO avec un  $N_{pop}$  relativement faible, tel que 150. On obtient ainsi un très bon *fitting* et une très bonne précision des paramètres.

AXO donne des paramètres avec une très faible précision pour tous les  $N_{pop}$ , et ne peut être utilisé que pour un bon *fitting*.

### 3.5.1.2 Courbes Bruitées

Un niveau de bruit  $p$  variant entre 0.1 à 10% a été ajouté à la courbe synthétique à l'aide de l'équation 3-1. Les paramètres des courbes bruitées ont été extraits par GA en utilisant UXO, AXO et BXO. Pour tous les cas traités, les solutions optimales ont été choisies comme les meilleures parmi 100 exécutions des GAs.

#### 3.5.1.2.1 Les opérateurs UXO et AXO

Les figures 3.5 et 3.6 montrent les erreurs des paramètres extraits par GAs en utilisant UXO et AXO en fonction de niveaux de bruit ( $p$ ). Ces courbes ont été obtenues en utilisant GAs avec  $N_{pop} = 20000$  et constituent les meilleurs résultats obtenus parmi tous les  $N_{pop}$  considérés.

On voit que les erreurs sont indépendantes de  $p$ . Pour les deux XOs,  $I_{ph}$  est le paramètre extrait avec la plus grande précision pour tous les niveaux de bruit, avec des erreurs inférieures respectivement à 1.2 % et 0.5 % pour UXO et AXO. Bien que les erreurs soient acceptables pour  $R_s$  et  $n$ , avec respectivement 14 % et 7 % pour UXO et AXO, elles atteignent des valeurs très élevées pour  $G_p$  et  $I_s$ . Les valeurs pour  $I_s$  et pour  $G_p$  sont respectivement 120 % et 210 % pour UXO et de 45 % et 80 % pour AXO. Il est clair que AXO donne de meilleures performances que UXO. Cependant les erreurs sont très élevées.

Pour les valeurs plus petites de  $N_{pop}$ , les erreurs sont plus grandes et le même comportement a été observé : les erreurs sont indépendantes de  $p$  et AXO donne des erreurs plus petites que UXO. L'invariance des erreurs en fonction de  $p$  ne fait que confirmer **la convergence prématurée** des deux opérateurs.

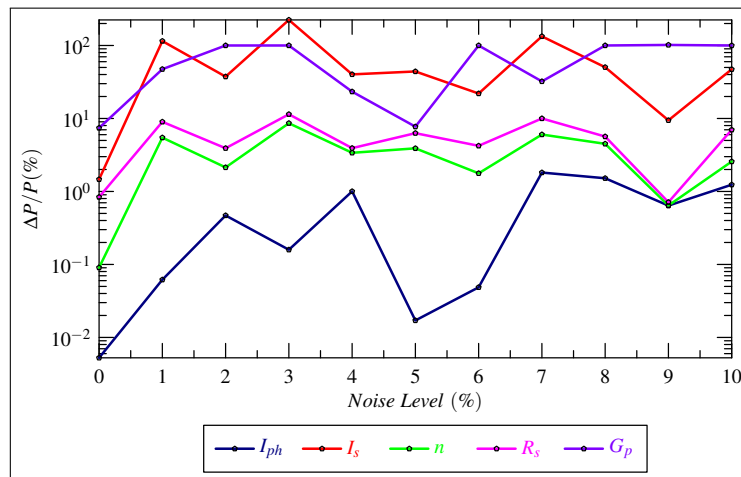


Figure 3.5 — PRÉCISIONS DES PARAMÈTRES SDM ESTIMÉS DE LA SC BRUITÉE EN FONCTION DU NIVEAU DE BRUIT  $p$  POUR L'OPÉRATEUR UXO.

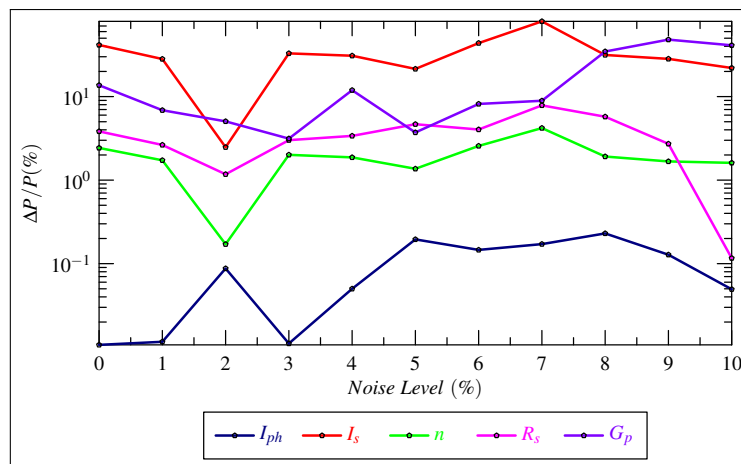


Figure 3.6 — PRÉCISIONS DES PARAMÈTRES SDM ESTIMÉS DE LA SC BRUITÉE EN FONCTION DU NIVEAU DE BRUIT  $p$  POUR L'OPÉRATEUR AXO.

### 3.5.1.2.2 L'opérateur BXO

La figure 3.7 montre les résultats obtenus avec GA en utilisant BXO avec  $N_{pop} = 250$  en fonction de  $p$ . On voit que les erreurs augmentent avec  $p$  et que toutes les erreurs sont inférieures à 10 %, sauf pour  $I_s$  qui atteint 30 % pour  $p$  supérieur à 6 %. Les erreurs respectives de  $I_{ph}$ ,  $n$ ,  $R_s$  et  $G_p$  sont toujours inférieures à 0.1 %, 2 %, 2 % et 10 %. Pour les cas pratiques ( $p$  inférieur à 5 %), toutes les erreurs sont inférieures à 10 %. Ainsi, BXO surpasse AXO et UXO pour les courbes bruitées.

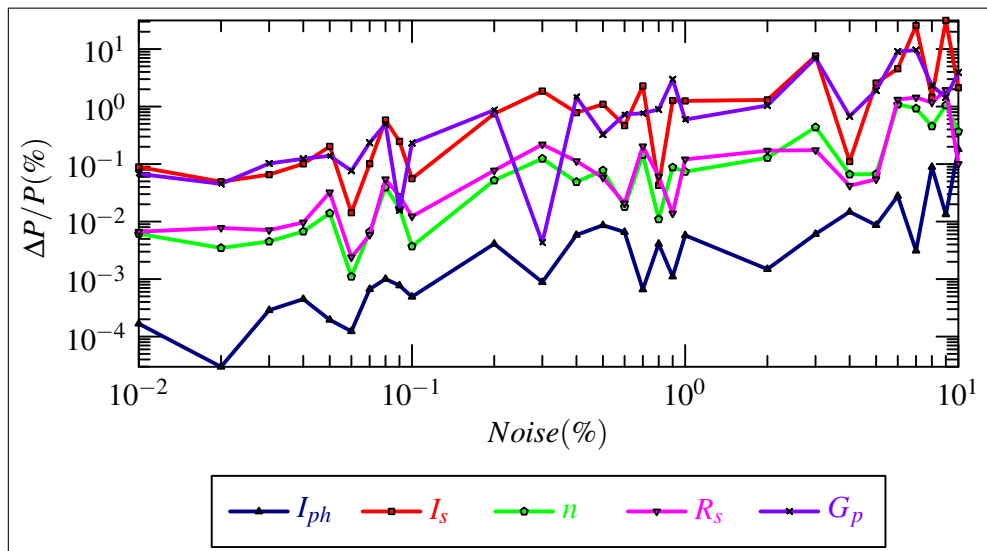


Figure 3.7 — Précisions des paramètres SDM estimés de la SC bruitée en fonction du niveau de bruit  $p$  pour l’opérateur BXO.

### 3.5.1.2.3 Fitting des courbes

Les figures 3.8, 3.9 et 3.10 montrent les courbes bruitées correspondant à  $p = 1, 2, 5$  et 10 %, ainsi que les  *fittings*  correspondants par UXO, AXO et BXO. La comparaison des courbes avec la courbe synthétique ( $p = 0 %$ ) montre le bon  *fitting*  obtenu pour AXO et BXO. Dans la région  $I_{sc}-I_m$ , UXO donne un  *fitting*  moins bon, ce qui n’est acceptable que parce que les courbes sont bruitées.

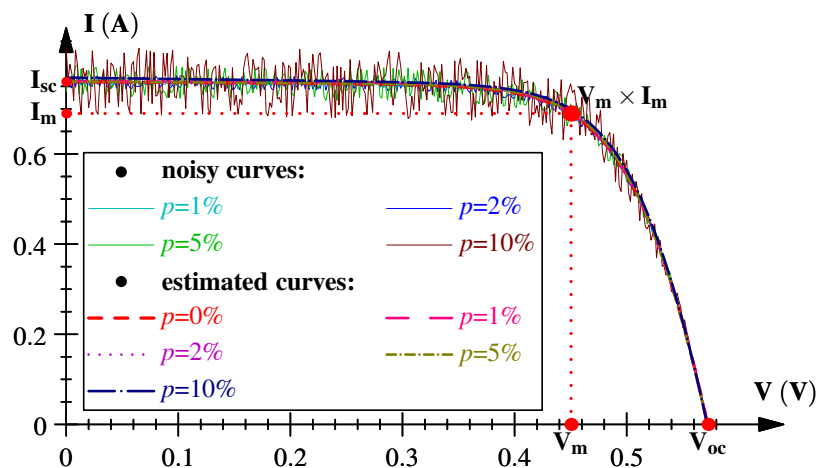


Figure 3.8 — COURBES  $I-V$  SYNTHÉTIQUES BRUITÉES ET  *FITTINGS*  CORRESPONDANTS AVEC LES PARAMÈTRES EXTRAITS À L’AIDE D’UXO AVEC  $N_{pop} = 20000$ .



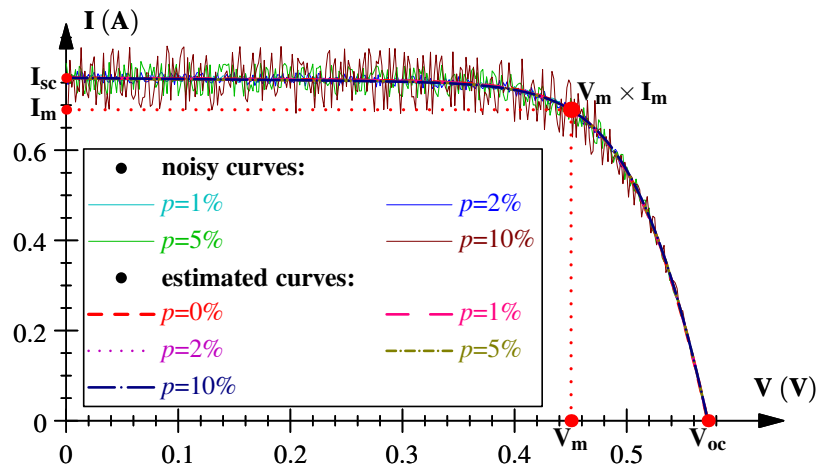


Figure 3.9 — COURBES  $I-V$  SYNTHÉTIQUES BRUITÉES ET FITTINGS CORRESPONDANTS AVEC LES PARAMÈTRES EXTRAITS À L'AIDE D'AXO AVEC  $N_{pop} = 20000$ .

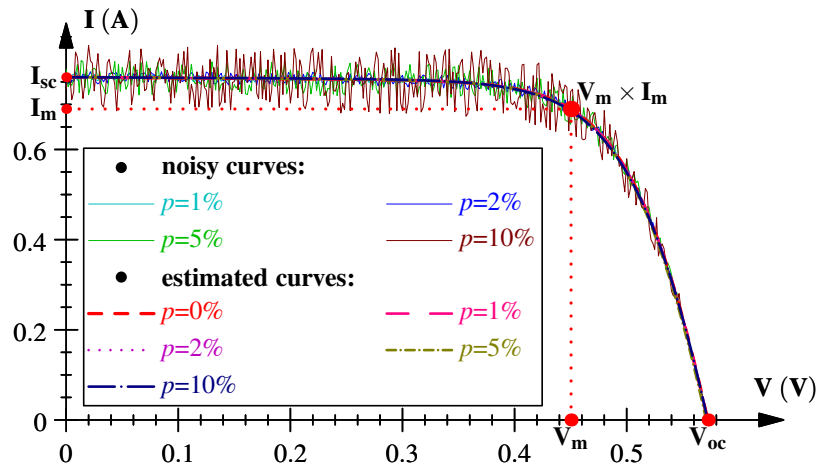


Figure 3.10 — COURBES  $I-V$  SYNTHÉTIQUES BRUITÉES ET FITTINGS CORRESPONDANTS AVEC LES PARAMÈTRES EXTRAITS À L'AIDE D'BXO AVEC  $N_{pop} = 20000$ .

### 3.5.1.2.4 Commentaires

Comme pour la courbe non-bruitée, la qualité du *fitting* et la précision des paramètres extraits sont fortement affectées par l'opérateur **XO** utilisé. Alors que **AXO** et **BXO** donnent un bon *fitting*, seul **BXO** donne en plus une haute précision des paramètres. Pour **UXO**, ni le *fitting* ni la précision des paramètres ne sont bons.

## 3.5.2 Données Expérimentales

Les **GAs** ont été appliqués à l'extraction des paramètres de la **SC** la plus utilisée dans la littérature [14]. La table 3.5 montre les résultats optimaux obtenus ainsi que ceux de certaines

travaux récemment publiées, à savoir **Grouping-Based Global Harmony Search (GGHS)** Innovative Global Harmony Search (IGHS) par Askarzadeh et Rezazadeh [121], **Adaptative Differential Evolution (J. Brest *et al.* [97]) (jDE)**, **Self-Adaptive Teaching-Learning-Based Optimization algorithm (SATLBO)** et **Performance Guided JAYA algorithm (PGJAYA)** par Fébba *et al.* et **Differential Evolution with Dynamic Control Factors (DEDCE)** par Parida et Rout [110]. La figure 3.11 montre les fitting obtenus.

Les résultats de **UXO** et **AXO** ont été obtenus avec  $N_{pop} = 20000$  et sont très proches de ceux de **BXO**. Cependant, ils n'ont été obtenus qu'une seule fois dans toutes les exécutions des **GAs** (1400 exécutions), et il n'y a aucune garantie qu'ils soient reproduits. **AXO** a donné des résultats meilleurs que ceux des références [5] et [121], mais moins bons que **BXO**.

**Table 3.5** — Paramètres de la SC RTC extraits par différentes méthodes

Méthode	$I_{ph}$ (A)	$I_s$ ( $\mu A$ )	$n$	$R_s$ ( $\Omega$ )	$G_p$ ( $\Omega^{-1}$ )	RMSE ( $\times 10^{-4} A$ )
<b>Ce travail [122]</b>						
<b>BXO</b> <sup>a</sup> [122]	0.7608	0.3107	1.4773	0.0365	0.0189	<b>7.73006</b>
<b>UXO</b> <sup>b</sup> [122]	0.7606	0.3059	1.4757	0.0367	0.0181	7.87296
<b>AXO</b> <sup>c</sup> [122]	0.7606	0.4455	1.5143	0.0349	0.0157	9.65930
<b>Travaux précédents</b>						
<b>GGHS</b> [121]	0.7609	0.3262	1.4822	0.0363	0.0188	9.9097
<b>Fébba</b> [5] <sup>d</sup>	0.7068	0.3230	1.4812	0.0364	0.0537	9.8602
<b>DEDCE</b> [110]	0.7608	0.3107	1.4767	0.0365	0.0189	<b>7.73006</b>
<b>IGHS</b> [121]	0.7608	0.3435	1.4874	0.0361	0.0188	9.9306

a. Obtenus avec  $N_{pop} \geq 150$  [122]

b. Obtenus avec  $N_{pop} = 20000$  [122]

c. Obtenus avec  $N_{pop} = 20000$  [122]

d. jDE., PGJAYA et SATLBO [5]

**BXO** donne les mêmes **RMSE**,  $I_{ph}$ ,  $I_s$ ,  $R_s$  et  $G_p$  que **DEDCE** qui détient le record du plus petit **RMSE** ( $7.730062 \times 10^{-4}$ ) pour cette SC dans la littérature [110]. Il n'y a qu'une légère différence de 0.04 % dans la valeur de  $n$  (1.4773 pour **BXO** contre 1.4767 pour **DEDCE**). La concordance est parfaite.

On note également que les résultats présentés dans la table 3.5 pour **BXO** ont été reproduits dans chaque exécution des **GAs** pour toutes les valeurs de  $N_{pop}$  supérieur ou égal à 150 (1100 exécutions). Les différences n'ont été observées qu'au-delà du 7<sup>ème</sup> SD. Ainsi, **BXO** surpasse

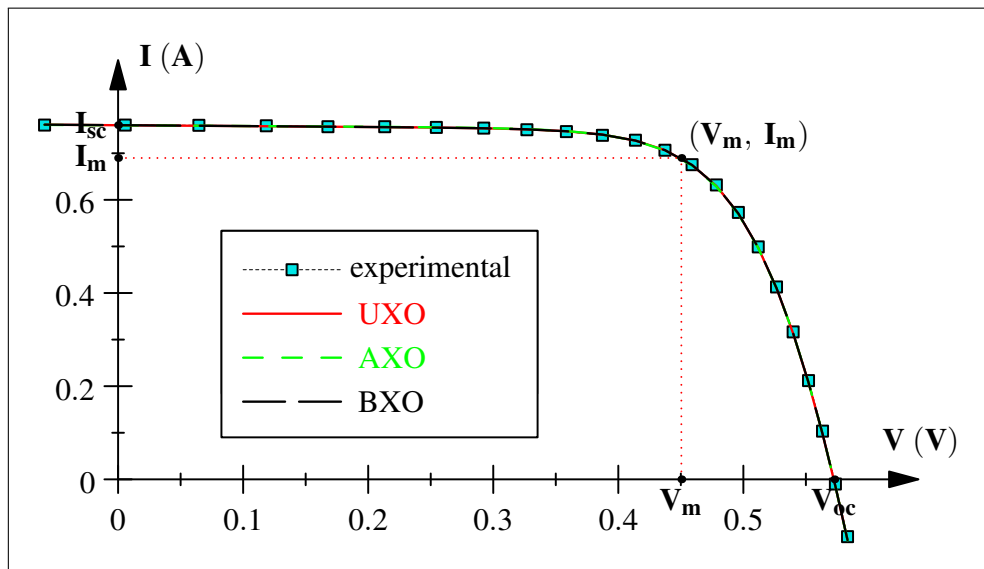


Figure 3.11 — Données expérimentales et *fittings* correspondants de la SC RTC.

UXO et AXO et rivalise avec les méthodes les plus efficaces.

### 3.6 Conclusion

Dans cette étude, nous avons analysé la précision des 5 paramètres SDM des SCs extraits de courbes  $I-V$  en utilisant les GAs et en considérant l'effet de 3 XOs, à savoir UXO, AXO et le BXO. Trois ensembles de données ont été utilisés, une cellule de référence expérimentale et des courbes simulées avec des niveaux de bruit ( $p$ ) variant de 0 à 10 %. L'analyse a été réalisée en faisant varier  $N_{pop}$  de 20 à 20000. Pour chaque triplet ( $XO, p, N_{pop}$ ), 100 exécutions des GAs ont été effectuées et la solution a été choisie comme résultat de la meilleure exécution.

Les résultats des simulations ont montré que les performances des GAs varient considérablement avec le XO utilisé. Lors de l'utilisation de UXO ou de AXO avec un  $N_{pop}$  très élevé (jusqu'à 20000), les GAs n'ont produit une bonne précision que dans les deux cas suivants :

- avec UXO pour la courbe non-bruitée
- et avec AXO pour la cellule de référence, obtenant un RMSE de  $7.87296 \times 10^{-4}$ .

Comme ce résultat n'a été obtenu qu'une seule fois sur plus de 1400 exécutions, il n'y a aucune garantie qu'il puisse être reproduit. Pour tous les autres cas, la précision des paramètres est très faible, explicitement :

- avec UXO, pour les données bruitées et la cellule de référence,
- avec UXO, pour la courbe non-bruitée avec  $N_{pop}$  faible et modéré,
- avec AXO, pour des données non-bruitées et bruitées,
- et avec AXO, pour la cellule de référence à faible et moyenne  $N_{pop}$ .

Cette mauvaise performance est une conséquence de la convergence prématurée, un problème bien connu des **EAs**. En tant que tels, les **GAs** avec **UXO** ou **AXO** ne sont pas recommandés pour l'extraction des paramètres des **SCs**.

D'autre part, les **GAs** donnent une très grande précision lors de l'utilisation de **BXO** avec un  $N_{pop}$  aussi petit que 150, pour tous les cas analysés :

- pour la courbe non-bruitée, les erreurs de paramètres sont inférieures à  $10^{-13}$  %,
- pour les données bruitées, les erreurs de paramètres sont inférieures à 10 % pour les cas pratiques, c'est-à-dire pour les bruits inférieurs 5 %, et inférieures à 30 % pour  $p$  allant jusqu'à 10 %
- et pour la courbe de référence, les **GAs** donnent le même **RMSE** que **DEDCF** [110] qui donne le plus petit **RMSE** pour cette **SC** qu'on trouve dans la littérature ( $7.730062 \times 10^{-4}$ ).

Il est important de noter que les résultats ci-dessus ont été reproduits dans chacune des 100 exécutions des **GAs** pour chaque  $N_{pop}$  et ont la même qualité que les 5 méthodes considérées dans [5]. Ces résultats démontrent que pour l'extraction des paramètres des **SCs**, les **GAs** avec **BXO** doivent être classés avec **EAs** les plus efficaces.

Des études antérieures menées sur des données non-bruitées ont conclu que les **GAs** donnent une mauvaise précision ou/et ne sont pas appropriés pour l'extraction des paramètres des **SCs** [7, 25–27, 123–125]. Dans ce travail, nous avons utilisé des données non-bruitées et bruitées, et nous avons montré que si ces conclusions sont correctes pour la **UXO** ou la **AXO**, elles ne le sont pas pour le **BXO**. Par conséquent, cette étude recommande l'utilisation des **GAs** avec **BXO** pour l'extraction des paramètres des **SCs**. Ce résultat est à confirmer avec d'autres **OF**, d'autres données expérimentales et d'autres **XOs**. Les travaux futurs sur les **EAs** doivent étudier les effets de la variation des opérateurs génétiques sur les paramètres extraits.

# Contribution à la Modélisation des Modules Photovoltaïques

\*\*\*\*\*

---

4.1	Introduction . . . . .	67
4.2	Estimation des paramètres de quelques courbes sélectionnées . . . . .	69
4.3	Variation des paramètres des modules PVs en fonction de la température et de l'illumination . . . . .	78
4.4	Conclusion . . . . .	101

---

## 4.1 Introduction

Pour étudier la variation des paramètres électriques des modules PVs en fonction de la température (T) et de l'illumination (S), nous avons utilisé des caractéristiques  $I-V$  d'une base de donnée mise à la disposition des chercheurs par le laboratoire américain *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) [15]. Les données ont été collectées dans trois sites à climats différents (Cocoa en Floride, climat sous tropical ; Eugene en Oregon, climat marin cote ouest ; et Golden au Colorado, climat continental) pour des modules de plusieurs technologies :

- Silicium mono-cristallin (x-Si)
- Silicium multi-cristallin (m-Si)
- Cadmium-telluride (CdTe)
- Cuivre-indium-gallium-selenide (CIGS)
- Silicium amorphe (a-Si) double et triple-jonction
- Cellule hétérojonction HIT : silicium amorphe/silicium cristallin
- Silicium-amorphe/silium-microristallin

Les courbes  $I-V$  ont été prélevées à une cadence journalière et à des intervalles de temps va-

**Table 4.1** — Spécifications des modules PVs considérés dans ce travail (dans les conditions STC).

Module PV	mSi0166	xSi11246	xSi12922
Lieu d'installation	Cocoa	Golden	Cocoa
Cellules en série	36	36	36
Cellules en parallèle	1	1	1
Section des Cellules [m <sup>2</sup> ]	0.3429	0.6470	0.6470
$I_{sc}$ [A]	2.65994	4.97500	4.98327
$V_{oc}$ [V]	22.0341	21.9851	21.9461
$I_m$ [A]	2.44501	4.43791	4.48661
$V_m$ [V]	17.9879	17.3352	17.3900

riant entre 5 et 15 mn durant une année, donnant ainsi plus de 120 courbes par jour. Chaque courbe a été enregistrée avec toutes les informations environnementales dont la température et l'illumination. Plus de détails sur la base de donnée peuvent être trouvés dans la référence [15].

La table 4.1 reprend les spécifications des modules PVs considérés dans ce travail.

La méthode à base de GAs, décrite dans le chapitre le chapitre 3 précédent, a été appliquée pour extraire les paramètres SDM de ces modules. Vu le très grand nombre de courbes traitées (plus de 75000 courbes), et pour réduire le temps de calcul tout en gardant une bonne précision des paramètres, le critère d'arrêt a été choisi comme suit :

- soit on atteint un nombre d'itérations maximal fixé à 2000,
- soit le RMSE est inférieur à 7 mA et 5 mA pour les modules PVs respectivement au silicium mono-cristallin et multi-cristallin .
- Les GAs sont exécutés au maximum trois fois sur chaque courbe si le nombre d'itérations maximal est atteint.

Dans les sections suivantes, on décrit les résultats obtenus suivants :

- Dans une première étude, des courbes sélectionnées seront traitées pour valider la méthode en comparant les résultats avec des travaux publiés.
- Dans une deuxième étude, la variation des paramètres SDM de deux modules sélectionnées sera considérée de façon qualitative. À cette effet, seront traités :
  - le *fitting* des courbes,
  - la variation des paramètres en fonction de  $T$
  - et la variation des paramètres en fonction de  $S$ .

## 4.2 Estimation des paramètres de quelques courbes sélectionnées

Dans cette section, on présente les résultats de l'extraction des paramètres de quelques courbes des modules mSi0166 (Cocoa), xSi11246 (Golden) et xSi12922 (Cocoa). Ces courbes ont été choisies pour des raisons de comparaison avec les résultats de travaux publiés [29, 104, 126].

### 4.2.1 Module mSi0166 (Cocoa)

Y. Zhang *et al.* [29] ont utilisé les méthodes de Nunes *et al.* [127] et Laudani *et al.* [128] pour extraire les paramètres SDM de cinq courbes du module mSi0166 (Cocoa), sélectionnées pour des températures proches de 25 °C et à des illuminations variées. La table 4.2 montre leurs résultats avec ceux obtenus dans ce travail. On remarque qu'en terme de RMSE, la méthode de Laudani donne de très mauvais résultats et que celle de Nunes et la notre sont très proches ; la notre est meilleure pour 4 des 5 courbes considérées. On peut voir le très bon *fitting* obtenu sur la figure 4.1.

La table 4.2 met en évidence un fait marquant, la valeur très faible de  $R_s$  pour les illuminations basses (courbes C1 et C2). La méthode de Nunes donne des valeurs proche du *zéro machine* et la notre donne la valeur *zéro*. Cette valeur montre que pour les faibles illuminations, le module est représenté par un modèle SDM à quatre paramètres ( $I_{ph}$ ,  $I_s$ ,  $n$  et  $G_p$ ) sans  $R_s$ , c'est un modèle très rarement considéré dans la littérature qui mérite une étude particulière.

Dans un autre travail, C. Zhang *et al.* [126] ont considéré le même module en calculant la puissance maximale  $P_m$ , l'erreur obtenue sur  $P_m$  par rapport à la valeur mesurée et le RMSE de cinq autres courbes sans donner les valeurs des paramètres SDM. Ils ont extrait les paramètres en utilisant une méthode propre et la méthode de De Soto *et al.* [129]. La table 4.3 montre leurs résultats avec ceux obtenus dans ce travail où nous n'avons fait aucune optimisation pour le calcul de  $P_m$ , c-à-d aucune interpolation numérique n'a été opérée. La table montre clairement la supériorité de notre méthode sur 4 des 5 courbes considérées et la figure 4.2 montre le bon *fitting* obtenu.

### 4.2.2 Module xSi11246 (Golden)

C. Zhang *et al.* [126] ont considéré cinq courbes du module xSi11246 (Golden) en calculant la puissance maximale  $P_m$ , l'erreur obtenue sur  $P_m$  par rapport à la valeur mesurée et le RMSE de cinq autres courbes sans donner les valeurs des paramètres SDM. Ils ont extrait les paramètres en utilisant une méthode propre et la méthode de De-Soto *et al.* [129]. La table 4.4 montre leurs résultats avec ceux obtenus dans ce travail où nous n'avons fait aucune optimisation pour le calcul de  $P_m$ , c-à-d aucune interpolation numérique. La table montre clairement la

**Table 4.2** — Paramètres des cinq courbes considérées par Y. Zhang *et al.* [29] du module PV mSi0166 (Cocoa) au silicium multicristallin extraits par différentes méthodes

Méthode	$I_{ph}$ (A)	$I_s$ ( $\mu A$ )	$n^a$	$R_s$ ( $\Omega$ )	$G_p^b$ ( $\Omega^{-1}$ )	RMSE ( $\times 10^{-3} A$ )
<b>Courbe C1 : S = 199.9 W/m<sup>2</sup> et T = 25.0 °C</b>						
Laudani [29, 128]	0.562	$9.72 \times 10^{-6}$	32.112	2.124	1/392.1	16.82
Nunes [29, 127]	0.563	$2.66 \times 10^{-1}$	54.684	$4.27 \times 10^{-15}$	1/708.9	3.570
Ce travail	0.563	$2.67 \times 10^{-1}$	54.672	0	0.00141	3.536
<b>Courbe C2 : S = 398.2 W/m<sup>2</sup> et T = 25.1 °C</b>						
Laudani [29, 128]	1.029	$1.42 \times 10^{-5}$	32.4	1.044	1/357.4	22.32
Nunes [29, 127]	1.029	$2.31 \times 10^{-1}$	52.884	$2.02 \times 10^{-15}$	1/888.3	2.189
Ce travail	1.029	$2.31 \times 10^{-1}$	52.894	0	0.001125	2.035
<b>Courbe C3 : S = 598.1 W/m<sup>2</sup> et T = 25.3 °C</b>						
Laudani [29, 128]	1.593	$1.45 \times 10^{-5}$	32.976	0.691	1/290.9	28.86
Nunes [29, 127]	1.592	$1.29 \times 10^{-1}$	51.264	0.08337	1/754.5	2.985
Ce travail	1.593	$1.29 \times 10^{-1}$	51.273	0.08337	0.001325	2.899
<b>Courbe C4 : S = 801.6 W/m<sup>2</sup> et T = 24.6 °C</b>						
Laudani [29, 128]	2.124	$1.46 \times 10^{-5}$	33.192	0.564	1/249.3	33.24
Nunes [29, 127]	2.123	$5.84 \times 10^{-2}$	48.960	0.1645	1/590.7	2.768
Ce travail	2.123	$5.57 \times 10^{-2}$	48.834	0.1672	0.001714	2.772
<b>Courbe C5 : S = 1004.9 W/m<sup>2</sup> et T = 25.4 °C</b>						
Laudani [29, 128]	2.678	$1.85 \times 10^{-5}$	33.336	0.492	1/225.4	40.21
Nunes [29, 127]	2.678	$5.89 \times 10^{-2}$	48.564	0.1875	1/578.2	3.584
Ce travail	2.677	$5.89 \times 10^{-2}$	48.960	0.1875	0.001729	3.524

a. Y. Zhang *et al.* [29] donnent  $n$  correspondant à une SC. Ici il est multiplié par le nombre de cellules (36).

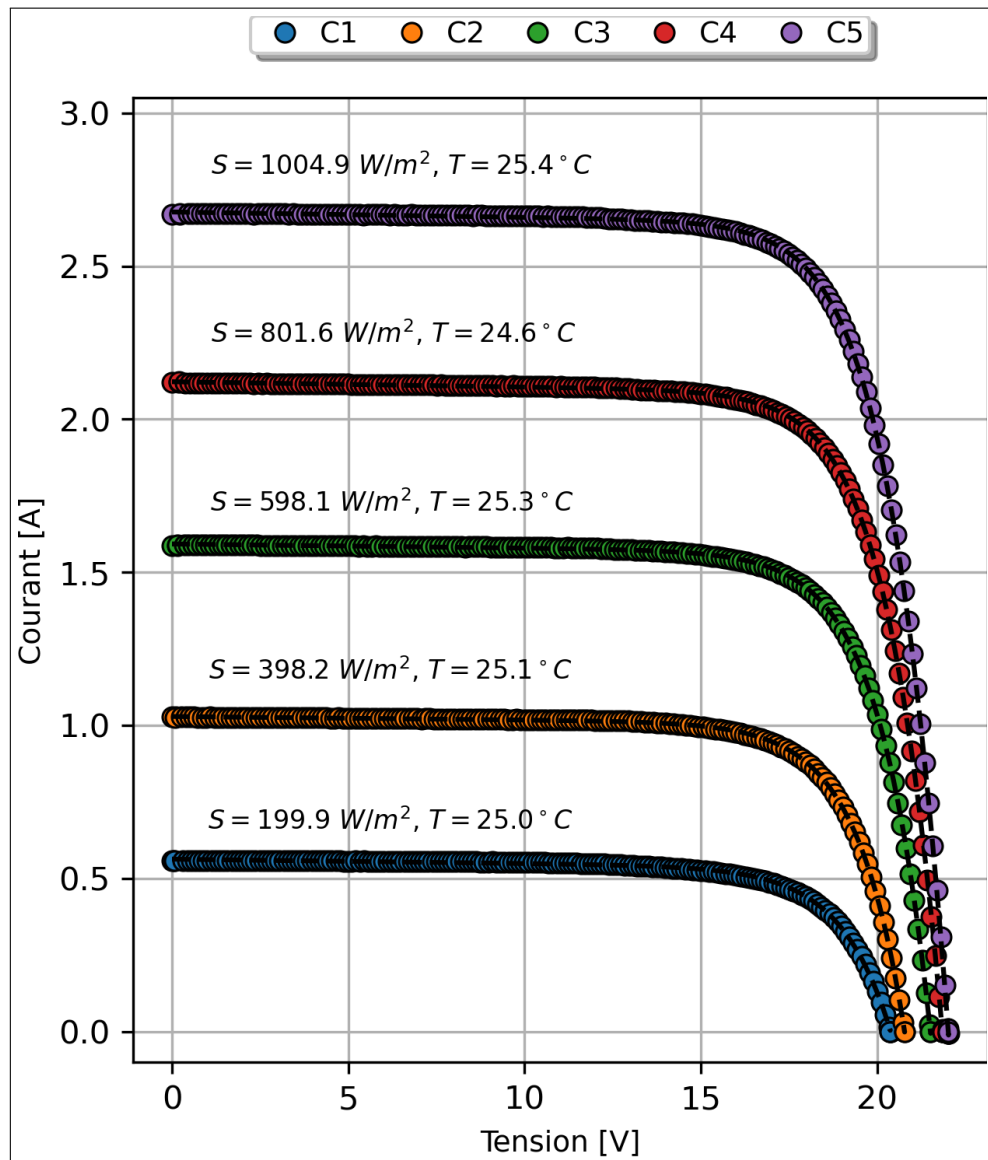
b. Y. Zhang *et al.* [29] donnent  $R_p$  au lieu de  $G_p = 1/R_p$ .

supériorité de notre méthode sur 4 des 5 courbes considérées et la figure 4.3 montre le bon *fitting* obtenu.

### 4.2.3 Module xSi12922 (Cocoa)

Ortiz-Conde *et al.* [104] ont utilisé une méthode propre pour extraire les paramètres SDM de six courbes du module xSi12922(Cocoa), sélectionnées pour des températures et à des illuminations variées. La table 4.5 montre les résultats avec ceux obtenus dans ce travail. On remarque





**Figure 4.1** — Caractéristiques  $I-V$  expérimentales (o) et simulées (---) des cinq courbes du module PV mSi0166 au silicium multicristallin installé à Cocoa correspondant à la Table 4.2.

qu'en terme de **RMSE**, notre méthode surclasse la méthode d'Ortiz-Conde *et al.* sur cinq des six courbes. La figure 4.1 montre le bon *fitting* obtenu. On remarque la valeur nulle obtenue de  $R_s$  pour la courbe C1 où l'illumination est très faible. C'est la même remarque que celle de la table 4.2 obtenu pour le module mSi0166 ; le module est représenté par un modèle **SDM** à quatre paramètres ( $I_{ph}$ ,  $I_s$ ,  $n$  et  $G_p$ ) sans  $R_s$ .

**Table 4.3** — Paramètres électriques et puissance maximale des cinq courbes considérées par C. Zhang *et al.* [126] du module PV mSi0166 (Cocoa) au silicium multicristallin extraits par différentes méthodes

Méthode	$I_{ph}$ (A)	$I_s$ (nA)	$n$	$R_s$ ( $\Omega$ )	$G_p$ ( $m\Omega^{-1}$ )	$P_m$ mesuré (W)	$P_m$ calculé (W)	Erreur %	RMSE ( $\times 10^{-3}A$ )
<b>C1 : S = 1048.6 W/m<sup>2</sup> et T = 50.0 °C<sup>a</sup></b>									
Ce travail	2.869	568	47.07	0.2150	2.820		42.42	0.0867	3.099
Zhang [126]						42.4568	46.94	1.047	14.8
De-Soto [126, 129]							46.33	2.36	87.1
<b>C2 : S = 827.5 W/m<sup>2</sup> et T = 37.1 °C</b>									
Ce travail	2.244	182	48.17	0.1775	1.918		35.40	0.0609	3.674
Zhang [126]						35.4196	35.34	0.212	6.8
De-Soto [126, 129]							35.26	0.36	48.1
<b>C3 : S = 664.6 W/m<sup>2</sup> et T = 36.2 °C</b>									
Ce travail	1.786	245	49.458	0.133	1.595		27.94	0.0519	2.932
Zhang [126]						27.9545	28.00	0.166	5.3
De-Soto [126, 129]							28.43	1.81	17.0
<b>C4 : S = 414.7.0 W/m<sup>2</sup> et T = 31.2 °C</b>									
Ce travail	1.145	351	52.73	0.0000	1.601		17.70	0.165	0.329
Zhang [126]						17.6708	17.78	0.626	8.3
De-Soto [126, 129]							18.04	2.18	41.0
<b>C5 : S = 224.6 W/m<sup>2</sup> et T = 34.9 °C</b>									
Ce travail	0.592	557	53.49	0.0000	1.634		8.35	0.828	0.320
Zhang [126]						8.2814	8.491	0.307	6.5
De-Soto [126, 129]							9.428	12.27	51.1

*a.* La valeur de  $P_m$  qu'on trouve dans la base de donnée est 42.4568 W comme mentionné ici. C. Zhang *et al.* [126, Table III] mentionne la valeur  $P_m = 47.44$  W, par rapport à laquelle ils ont calculé l'erreur.

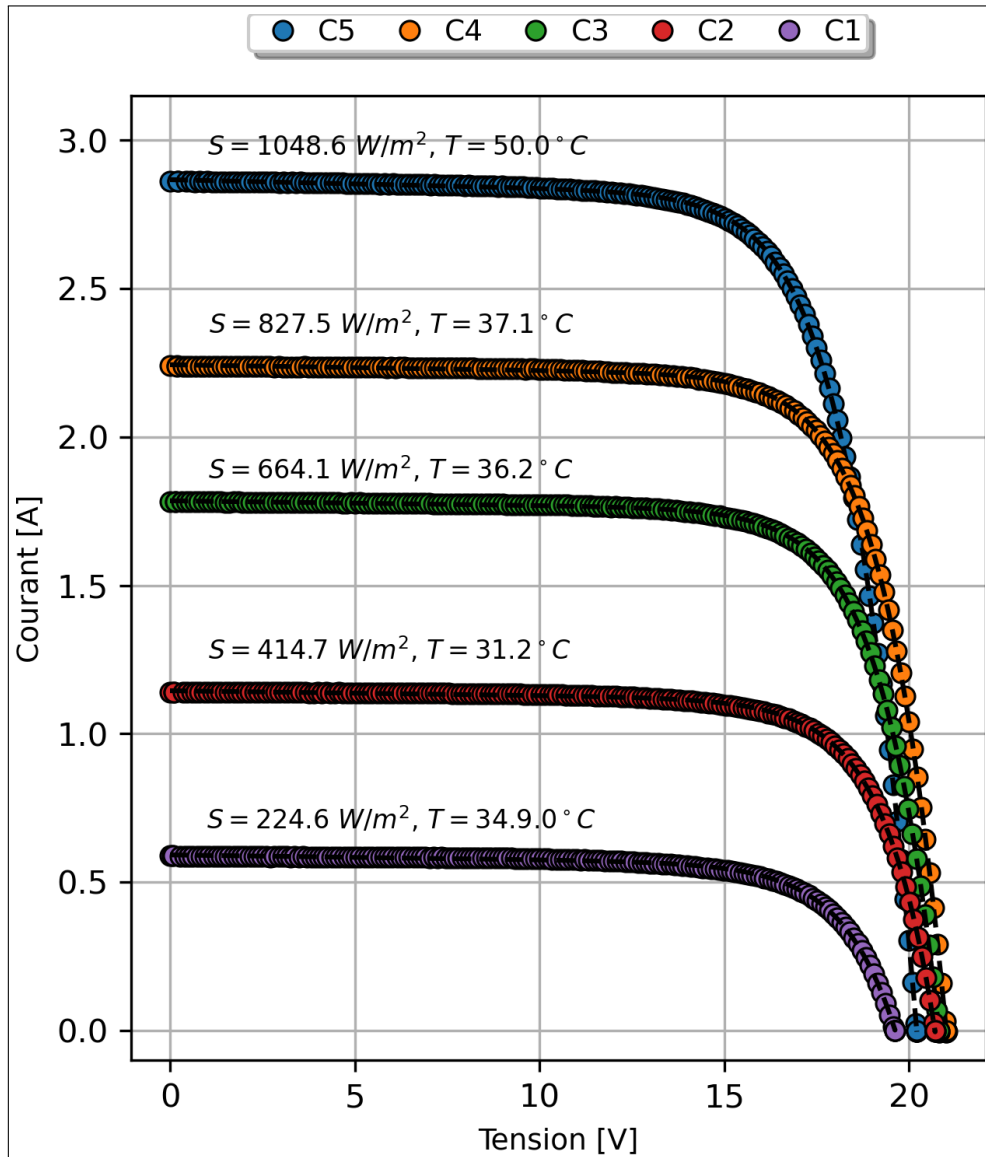


Figure 4.2 — Caractéristiques  $I-V$  expérimentales (o) et simulées (---) des cinq courbes du module PV mSi0166 au silicium multicristallin installé à Cocoa correspondant à la Table 4.3.

**Table 4.4** — Paramètres électriques et puissance maximale des cinq courbes considérées par C. Zhang *et al.* du module PV xSi11246 (Golden) au silicium monocristallin extraits par différentes méthodes

Méthode	$I_{ph}$ (A)	$I_s$ (nA)	$n$	$R_s$ ( $\Omega$ )	$G_p$ ( $m\Omega^{-1}$ )	$P_m$ mesuré (W)	$P_m$ calculé (W)	Erreur %	RMSE ( $\times 10^{-3}A$ )
<b>C1 : S = 230.3 W/m<sup>2</sup> et T = 33.9 °C</b>									
Ce travail	1.148	11.1	46.46	0.2059	1.088		17.18	0.116	0.8149
Zhang [126]						17.20	17.19	0.015	3.4
De-Soto [126, 129]							17.32	0.82	43.2
<b>C2 : S = 420.2 W/m<sup>2</sup> et T = 33.7 °C</b>									
Ce travail	1.984	200	48.07	0.2348	1.494		30.34	0.033	0.9062
Zhang [126]						30.35	30.49	0.458	15.8
De-Soto [126, 129]							31.92	4.95	66.5
<b>C3 : S = 662.6 W/m<sup>2</sup> et T = 44.8 °C</b>									
Ce travail	3.285	1400	50.168	0.242	1.834		47.75	0.042	1.808
Zhang [126]						47.77	47.31	0.952	16.5
De-Soto [126, 129]							47.14	1.33	86.4
<b>C4 : S = 863.0 W/m<sup>2</sup> et T = 53.7 °C</b>									
Ce travail	4.322	3034	49.61	0.2628	1.975		60.10	0.017	2.547
Zhang [126]						60.09	59.15	1.571	28.8
De-Soto [126, 129]							58.61	2.51	204.7
<b>C5 : S = 1053.6 W/m<sup>2</sup> et T = 58.4 °C</b>									
Ce travail	5.285	6747.4	50.51	0.2653	2.247		70.87	0.014	2.299
Zhang [126]						70.86	69.93	1.316	72.9
De-Soto [126, 129]							68.95	2.73	251.3

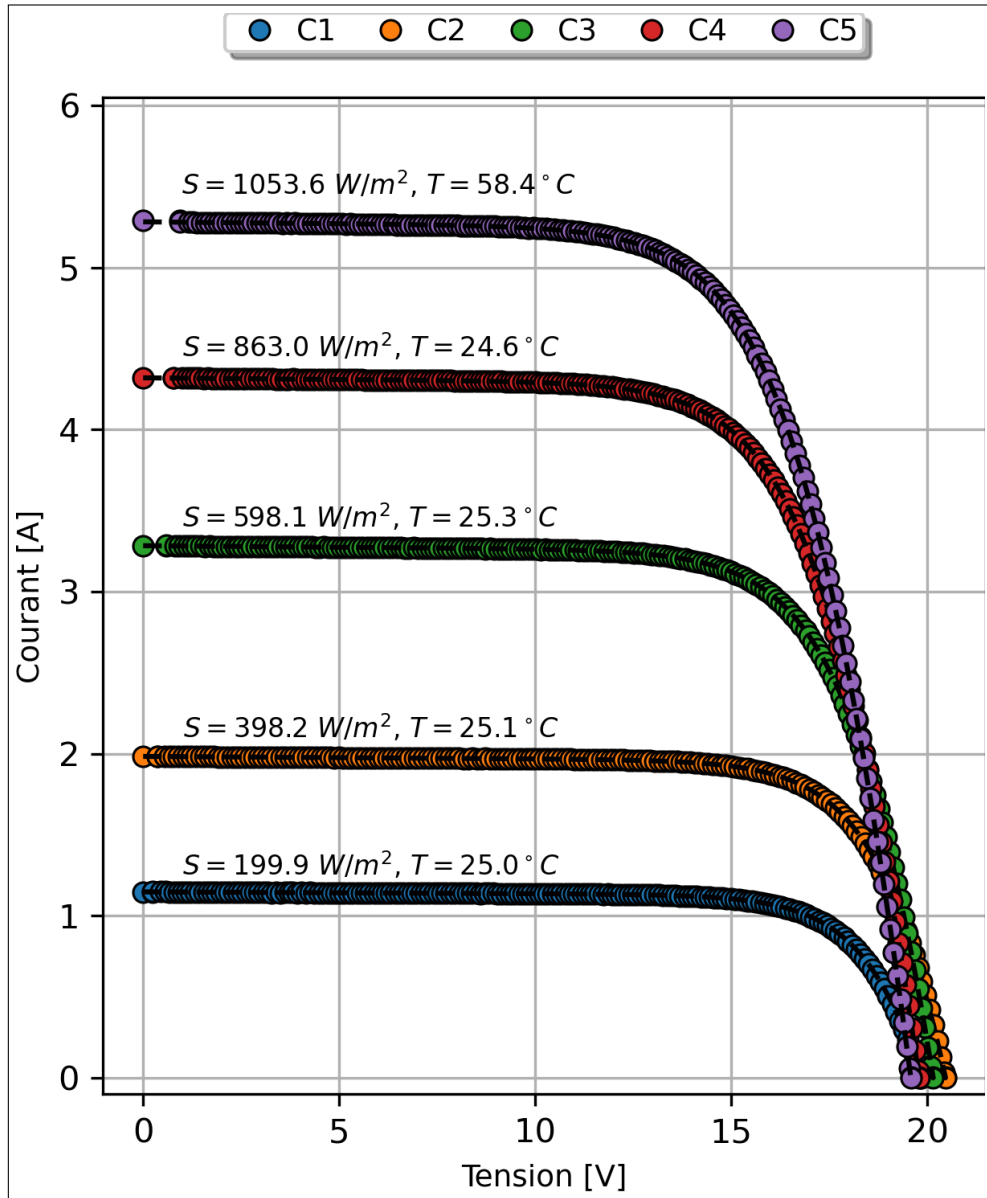


Figure 4.3 — Caractéristiques  $I-V$  expérimentales (o) et simulées (---) des cinq courbes du module PV xSi11246 au silicium monocristallin installé à Golden correspondant à la Table 4.4.

**Table 4.5** — Paramètres des six courbes considérées par Ortiz-Conde *et al.* [104] du module PV xSi12922 (Cocoa) au silicium monocristallin extraits par différentes méthodes

Méthode	$I_{ph}$ (A)	$I_s$ ( $\mu A$ )	$n^a$	$R_s$ ( $\Omega$ )	$G_p$ ( $\Omega^{-1}$ )	RMSE ( $\times 10^{-3} A$ )
<b>C1 : S = 251.8 W/m<sup>2</sup> et T = 23.4 °C</b>						
Ce travail	1.196	$9.60 \times 10^{-8}$	49.76	0.0000	0.001067	0.3476
Ortiz-Conde [104]	1.20	$1.30 \times 10^{-8}$	44.18	0.19	0.00148	0.779
<b>C2 : S = 810.0 W/m<sup>2</sup> et T = 34.2 °C</b>						
Ce travail	4.048	$1.30 \times 10^{-7}$	46.17	0.2481	0.00144	1.7532
Ortiz-Conde [104]	4.05	$1.30 \times 10^{-7}$	46.02	0.25	0.00143	1.43
<b>C3 : S = 1087.4 W/m<sup>2</sup> et T = 39.5 °C</b>						
Ce travail	5.444	$3.10 \times 10^{-7}$	46.69	0.2569	0.00378	5.6402
Ortiz-Conde [104]	5.44	$2.80 \times 10^{-7}$	46.35	0.26	0.00382	5.69
<b>C4 : S = 993.8 W/m<sup>2</sup> et T = 40.0 °C</b>						
Ce travail	4.99	$1.88 \times 10^{-7}$	45.2026	0.2645	0.00410	6.4508
Ortiz-Conde [104]	5.44	$2.90 \times 10^{-7}$	46.28	0.26	0.00382	5.69
<b>C5 : S = 262.3 W/m<sup>2</sup> et T = 31.3 °C</b>						
Ce travail	1.286	$2.76 \times 10^{-7}$	50.07	0.0000	0.00117	0.4463
Ortiz-Conde [104]	1.29	$2.80 \times 10^{-8}$	43.41	0.23	0.00175	1.31
<b>C6 : S = 360.8 W/m<sup>2</sup> et T = 26.7 °C</b>						
Ce travail	1.767	$3.49 \times 10^{-7}$	52.35	0.0000	0.00154	0.9266
Ortiz-Conde [104]	1.77	$4.4 \times 10^{-9}$	40.99	0.33	0.00283	2.68

*a.* Ortiz-Conde *et al.* [104] utilisent  $nV_{th}$  comme paramètre. Ici la valeur correspondante de  $n$  est déduite en conséquence.

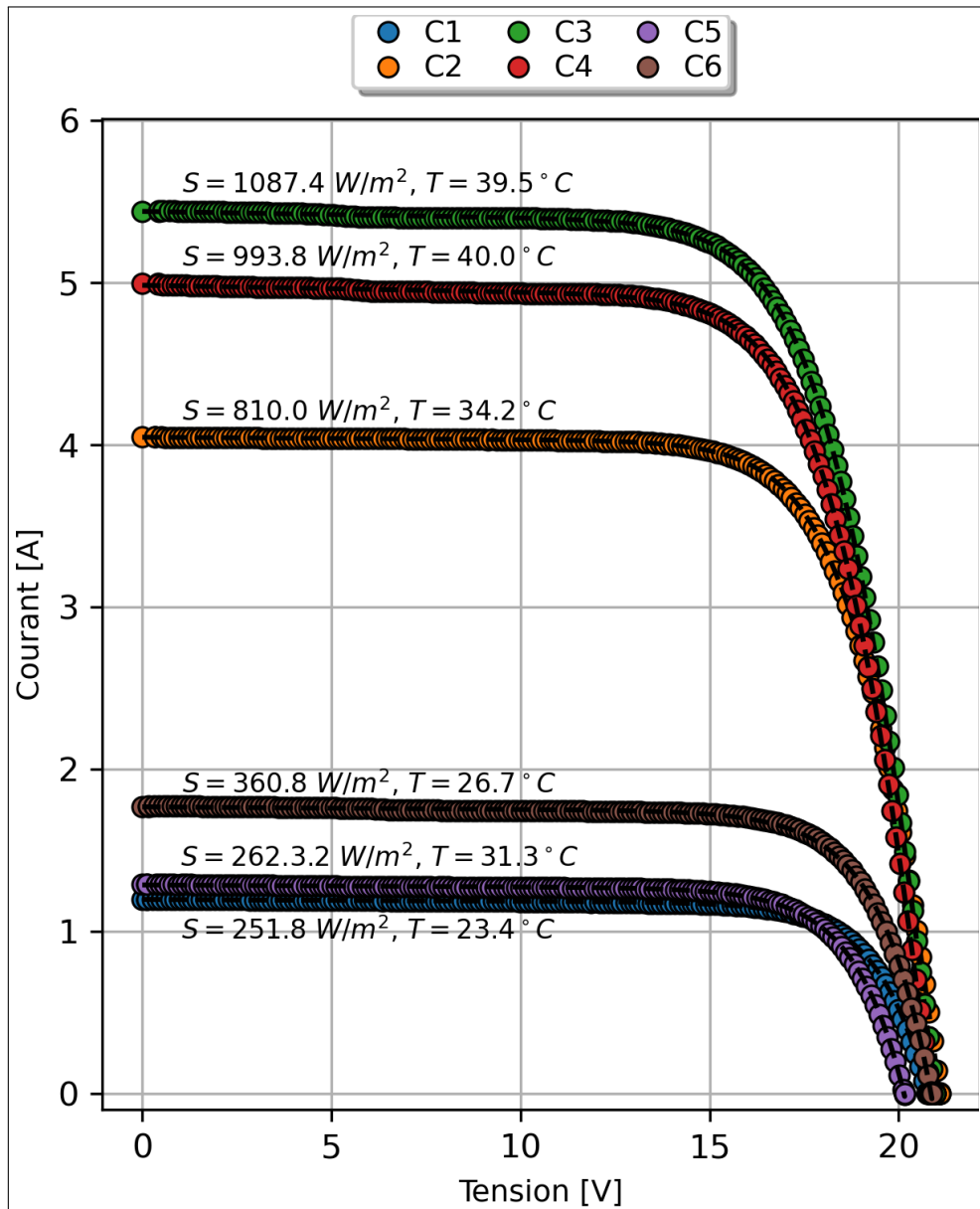


Figure 4.4 — Caractéristiques  $I-V$  expérimentales (o) et simulées (—) des six courbes du module PV xSi12922 au silicium monocristallin installé à Cocoa correspondant à la Table 4.5.

### 4.3 Variation des paramètres des modules PVs en fonction de la température et de l'illumination

Dans cette deuxième partie, nous explorons les courbes  $I-V$  de deux modules, l'un au silicium multi-cristallin (mSi0166 (Cocoa)) et l'autre au silicium mono-cristallin (xSi12922 (Cocoa)), dans le but de déduire la nature de la variation des cinq paramètres SDM en fonction de la température ( $T$ ) et de l'illumination ( $S$ ).

Rappelons que le courant  $I$  et la tension  $V$  dans un dispositif PV sont reliés par la relation

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V + R_s I}{nV_{th}}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_p} \quad [4 - 1] \triangleleft$$

Étant donné une température et une illumination de référence  $T_{ref}$  et  $S_{ref}$ , les relations les plus utilisées pour prédire la dépendance des paramètres SDM en fonction de  $S$  et de  $T$  sont données comme suit [130, 131] :

$$I_{ph}(S, T) = I_{ph,ref} \left( \frac{S}{S_{ref}} \right) \left[ 1 + \alpha_{I_{ph}} (T - T_{ref}) \right] \quad [4 - 2] \triangleleft$$

$$I_s(S, T) = I_{s,ref} \left( \frac{T}{T_{ref}} \right)^3 \exp\left(\frac{E_{g,ref}}{k_B T_{ref}} - \frac{E_g}{k_B T}\right) \quad [4 - 3] \triangleleft$$

$$R_s(S, T) = R_{s,ref} \quad [4 - 4] \triangleleft$$

$$R_p(S, T) = R_{p,ref} \left( \frac{S_{ref}}{S} \right) \quad [4 - 5] \triangleleft$$

$$n(S, T) = n_{ref} \quad [4 - 6] \triangleleft$$

Ces équations théoriques ont été établies en prenant en compte des considérations physiques et en supposant un découplage entre les effets de  $T$  et de  $S$ . Les coefficients  $\alpha$  sont les coefficients de température des paramètres portés en indice. Les autres grandeurs ont la signification déjà définie avec l'indice *ref* indiquant la valeur du paramètre à la condition de référence. La variation de  $E_g$  en fonction de la température est prise en compte dans l'expression de  $I_s$  selon la relation [4] :



$$E_g = E_{g,0} - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad [4 - 7] \triangleleft$$

avec, pour le silicium,  $E_{g,0} = 1.17$  eV,  $\alpha = 4.7 \times 10^{-4}$  eV/K et  $\beta = 606$  K.

Plusieurs travaux expérimentaux ont été conduits pour expliquer la nature de la variation des paramètres SDM en fonction de  $T$  et de  $S$  et vérifier les prédictions théoriques. La table 4.6 est une compilation faite par Fébba *et al.* [132] des principaux résultats qu'on trouve dans la littérature. Comme il en apparait, il n'y a aucune concordance entre les résultats des travaux, ils sont même contradictoire [132].

**Table 4.6** — Les différents types de variation des paramètres SDM des modules PVs en fonction de  $T$  et de  $S$  (d'après Fébba *et al.* [132]).

Paramètre	Augmentation de la Température	Augmentation de l'Irradiance
$I_{ph}$	Croissance linéaire	Croissance linéaire
$I_s$	Croissance polynomiale [133]	Croissance exponentielle [134]
	Croissance exponentielle [132, 135–137]	Croissance [138]
	Décroissance [139]	Décroissance [139]
	Croissance [140, 141]	
$n$	Décroissance linéaire [133, 135, 142, 143]	Croissance linéaire [134]
	Presque invariante [132, 140, 144]	Croissance [138]
		Décroissance linéaire [142]
		Décroissance [139]
		Coissance et Décroissance [137]
$R_s$	Croissance linéaire [133]	Invariante [132]
	Décroissance linéaire [142, 144]	Invariante [134]
	Croissance [145]	Croissance [138, 139]
	Décroissance [140, 146]	Décroissance [137, 141]
	Croissance exponentielle [135]	Coissance et Décroissance [132]
	Décroissance exponentielle [132, 147]	
$R_p$	Décroissance linéaire [133, 135, 142, 144]	Décroissance linéaire [134, 141, 142]
	Décroissance [140]	Décroissance [137, 138, 148]
	Décroissance exponentielle [132]	Croissance [140, 149]
		Invariante [142, 146]
	Coissance et Décroissance [132]	

### 4.3.1 Fitting des courbes

Pour étudier les variations des paramètres **SDM** en fonction de  $T$  et de  $S$ , on procède tout d'abord à leurs extractions. Vu le très grand nombre de courbes à traiter, le processus d'extraction des paramètres a été automatisé par un script écrit en langage *python* avec à la base le programme des **GAs** développé dans le chapitre 3. À chaque itération, le script prend une courbe et fait appel au **GAs**, collecte tous les résultats et les stocke sur disque. À l'issue des itérations, un autre script *python* procède au post-calculs et aux tracés des figures. Le programme à base de **GAs** (en C++) a été modifié pour tenir compte des critères énoncés dans l'introduction du chapitre (voir le paragraphe 4.1).

Selon les critères d'arrêt choisis, les **GAs** ont atteint le nombre d'itérations maximal sans obtenir les seuils de convergence fixés du **RMSE** pour seulement 11 sur 38989 et 339 sur 36765 courbes respectivement pour les modules **PVs** xSi12922 et mSi0166. Les figures 4.1, 4.2 et 4.4 sont des courbes représentatives des *fitting* obtenus pour les deux modules. Les figures montrent clairement les bon *fitting* obtenus.

Les figures 4.5 et 4.6 montrent les tracés des **RMSEs** obtenues dans le *fitting* des différentes courbes des deux modules en fonction de l'illumination  $S$ . On remarque que les *fitting* respectent les critères fixés. Les valeurs obtenues sont conformes aux valeurs qu'on trouve dans la littérature [29, 104, 126, 130, 150, 151].

Pour évaluer la précision des méthodes d'extraction de paramètres, les chercheurs adoptent plusieurs mesures (métriques) dont le **RMSE** (le *RMSE* moyen), le **MAE** (le *MAE* moyen), le **NRMSE** (le *NRMSE* moyen) et le **TRMSE** (la racine de la moyenne quadratique totale) définies comme suit :

$$\overline{RMSE} = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} [RMSE_i], \quad [4 - 8] \triangleleft$$

$$\overline{MAE} = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} [MAE_i], \quad [4 - 9] \triangleleft$$

$$\overline{NRMSE} = \frac{1}{N_c} \sum_{i=1}^{N_c} [NRMSE_i], \quad [4 - 10] \triangleleft$$

et

$$\overline{TRMSE} = \sqrt{\frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_c} N_t^i [RMSE_i]^2}, \quad [4 - 11] \triangleleft$$

où  $N_c$  est le nombre de courbes,  $N_t^i$  est le nombre de points de mesure de la courbe numéro  $i$ ,  $N_t$

est le nombre total de points de mesure contenus dans toutes les courbes ( $N_t = \sum_{i=1}^{N_c} N_t^i$ ). Les métriques **RMSE** (*Root Mean Square Error*), **MAE** (*Mean Absolute Error*) et **NRMSE** (*Normalised Root Mean Square Error*) sont définies comme suit :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} [I_{e,i} - I_{s,i}]^2}, \quad [4 - 12] \triangleleft$$

$$MAE = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} |I_{e,i} - I_{s,i}| \quad [4 - 13] \triangleleft$$

et

$$NMRSE = \frac{RMSE}{I_{sc}}. \quad [4 - 14] \triangleleft$$

$I_{e,i}$ ,  $I_{s,i}$  et  $I_{sc}$  sont respectivement le courant expérimental, le courant calculé (simulé) et le courant de court-circuit.

La table 4.7 reprend les métriques calculées pour les deux modules avec, à titre de comparaison, quelques unes qu'on trouve dans la littérature. Il s'agit des méthodes :

- "Separable Nonlinear Least Squares Search" (**SNLLS**) de Xu [150],
- "Two-Step Linear Least-Square" (**TSLLS**) de Toledo *et al.* [151],
- "Two-Step Linear Least-Square with Refinement" (**TSLLSwR**) de Toledo *et al.* [151],
- "Improved Transformation Equations Without Reference" (**ITEWRC**) de Zhang *et al.* [29],
- Hao *et al.* [130],
- Dobos *et al.* [130, 152],
- De Soto *et al.* [129, 130]
- et Ma *et al.* [130, 153].

On peut voir que :

- Toutes les mesures sont du même ordre de précision (quelques mA) sauf pour le  $\overline{TRMSE}$  et le  $\overline{NRMSE}$  calculés par Hao *et al.* [130] et par Zhang *et al.* [29] (quelques dizaines de mA).
- Pour le module PV xSi12922, notre méthode surclasse toutes les autres méthodes.
- Pour le module PV mSi0166, seul Toledo *et al.* en utilisant la méthode **TSLLSwR** trouve un résultat meilleur pour le  $\overline{RMSE}$  et le  $\overline{MAE}$ . Pour toutes les autres méthodes et les autres métriques, notre méthode est la meilleure.

Précisons que :

- Zhang *et al.* [29] ont exclus des calculs les courbes dont l'illumination S est inférieure à 100 W/m<sup>2</sup>, probablement pour éviter le problème inexplicable de  $R_s = 0$ .

**Table 4.7** — Comparaison des différentes métriques obtenues sur les modules PVs xSi12922 (Cocoa) et mSi0166 (Cocoa) avec des résultats publiés.

Méthode	$\overline{\text{RMSE}}$ (mA)	$\overline{\text{MAE}}$ (mA)	$\overline{\text{NRMSE}}$ (mA)	$\overline{\text{TRMSE}}$ (mA)
<b>Module PV xSi12922 (Cocoa)</b>				
Ce travail	2.3313	1.9416	1.6944	2.9827
Ce travail <sup>a</sup>	2.6516	2.2092	1.1350	3.2530
SNLLS [150]	2.4300	2.0300		
TSLLS [151] <sup>b</sup>	2.7300	2.0600		
TSLLSwR [151] <sup>b</sup>	2.3600	1.9700		
Hao [130] <sup>c</sup>			43.4	
Dobos [130,152] <sup>c</sup>			47.9	
De Soto [129,130] <sup>c</sup>			47.9	
Ma [130,153] <sup>c</sup>			61.5	
ITEWRC [29]				63.8
Laudani [29]				95.2
<b>Module PV mSi0166 (Cocoa)</b>				
Ce travail	2.3141	1.6011	3.4460	2.4628
Ce travail <sup>a</sup>	2.6532	2.1969	2.7465	2.6942
SNLLS [150]	2.7200	2.3100		
TSLLS [151] <sup>b</sup>	2.3700	1.9400		
TSLLSwR [151] <sup>b</sup>	2.1800	1.8200		
Hao [130] <sup>c</sup>			42.0	
Dobos [130,152] <sup>c</sup>			60.5	
De Soto [129,130] <sup>c</sup>			61.9	
Ma [130,153] <sup>c</sup>			64.3	

a. Calcul avec exclusion des calculs de toutes les courbes dont l'illumination  $S$  est inférieure à 100 pour comparaison avec les résultats de Hao [130] <sup>c</sup>.

b. Pour limiter le temps de calcul, Toledo *et al.* ont réduit le nombre de points de chaque courbe à 100 [151].

c. Hao *et al.* ont exclu des calculs toutes les courbes dont l'illumination  $S$  est inférieure à 100 [130].

— Toledo *et al.* ont limité le nombre de points par courbe à 100 pour contourner l'énorme temps de calcul.

Ces résultats prouvent la validité et la haute précision de notre méthode. Dans les sections suivantes, on traite qualitativement le problème de l'effet de la température  $T$  et de l'illumination  $S$  sur les paramètres **SDM**.

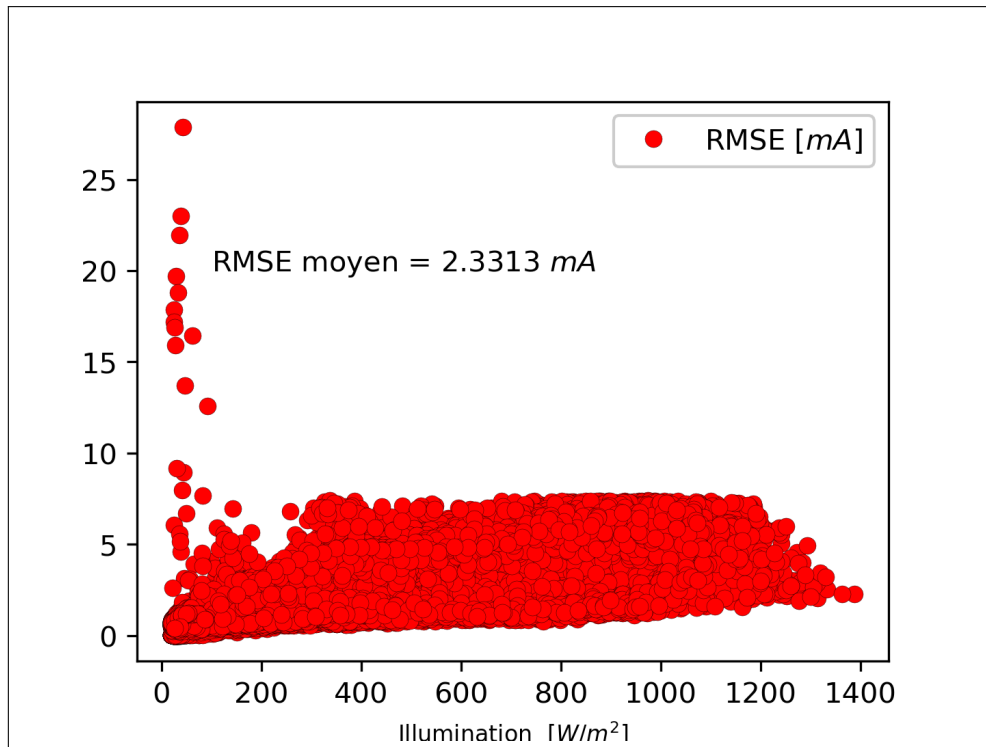


Figure 4.5 — RMSE EN FONCTION DE L'ILLUMINATION DU FITTING DES COURBES  $I-V$  EXPÉRIMENTALES DU MODULE PV xS112922 AU SILICIUM MONOCRISTALLIN INSTALLÉ À COCOA.

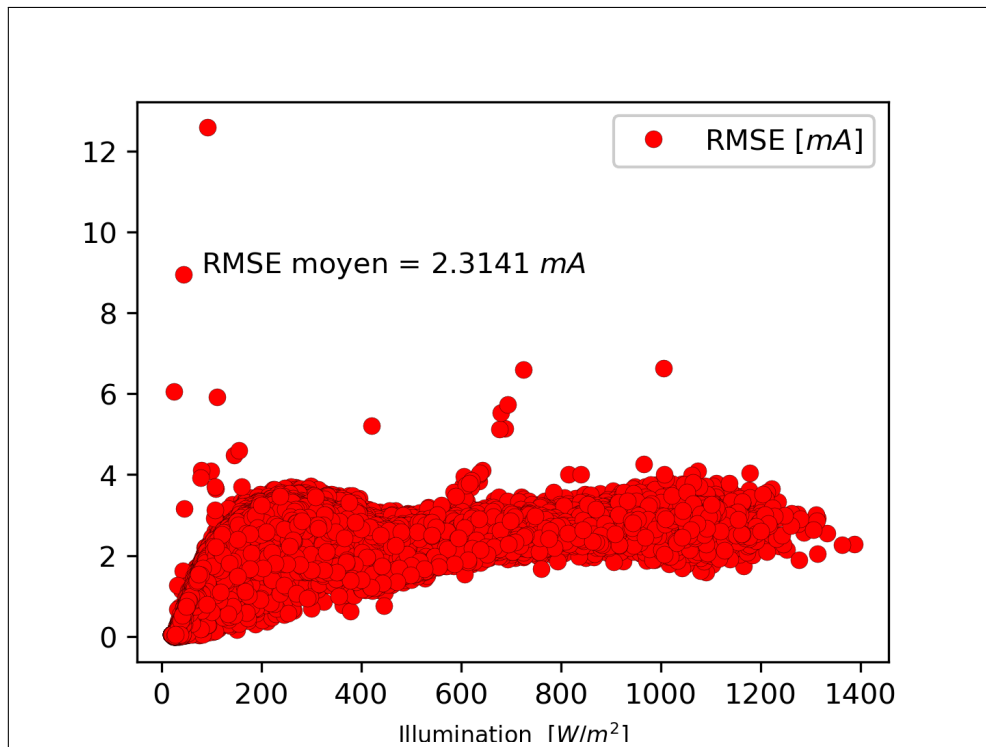


Figure 4.6 — RMSE EN FONCTION DE L'ILLUMINATION DU FITTING DES COURBES EXPÉRIMENTALES DU MODULE mS10166 AU SILICIUM MULTI-CRISTALLIN INSTALLÉ À COCOA.

### 4.3.2 Module xSi12922 (Cocoa)

Le premier module PV considéré est le xSi12922 au silicium cristallin, installé à Cocoa. La procédure d'extraction des cinq paramètres SDM, mentionnée dans le paragraphe 4.3, a été appliquée à toutes les courbes de la base de données (au nombre de 38989 courbes). Les principaux résultats sont détaillés dans ce qui suit.

#### 4.3.2.1 Effet de la Température sur le Module xSi12922 (Cocoa)

Les figures 4.7, 4.8, 4.9, 4.10, 4.11 et 4.12 montrent les résultats des *fitting* des paramètres  $I_{ph}$ ,  $I_s$ ,  $n$ ,  $R_s$  et  $R_p$  en fonction de  $T$  respectivement pour  $S = 50, 150, 200, 800, 1000$  et  $1300 \text{ W/m}^2$ . Plusieurs points sont à observer :

- Pour  $S \leq 150 \text{ W/m}^2$ , on trouve  $R_s = 0 \Omega$ . Le modèle SDMs est réduit à un modèle à 4 paramètres sans  $R_s$  (cas déjà mentionné dans le paragraphe 4.2.3). À notre connaissance, ce cas n'a pas été mentionné dans la littérature auparavant.
- $I_s$  suit une loi exponentielle croissante conforme à la théorie et à ce qu'on trouve dans la littérature.

$$I_s = a \exp\left(\frac{b}{T}\right), \quad [4 - 15] \triangleleft$$

ou  $a$  et  $b$  sont des paramètres de *fitting*.

- Tous les autres paramètres présentent une variation linéaire avec un très faible coefficient de température de sorte que le paramètre en question est considéré constant. Ce comportement est conforme à la théorie et à ce qu'on trouve dans la littérature (voir la table 4.6).

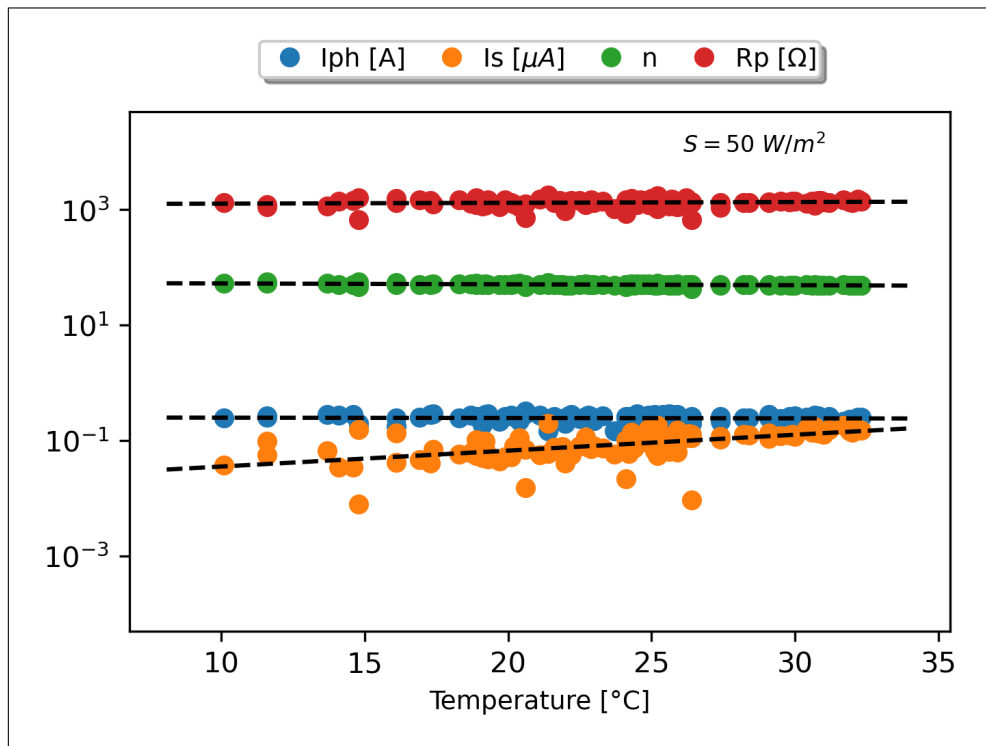


Figure 4.7 — Variations des paramètres du module PV xSi12922 au silicium monocristallin installé à Cocoa pour  $S = 50 \text{ W/m}^2$ . Valeurs mesurées (o) et *fitées* (—).

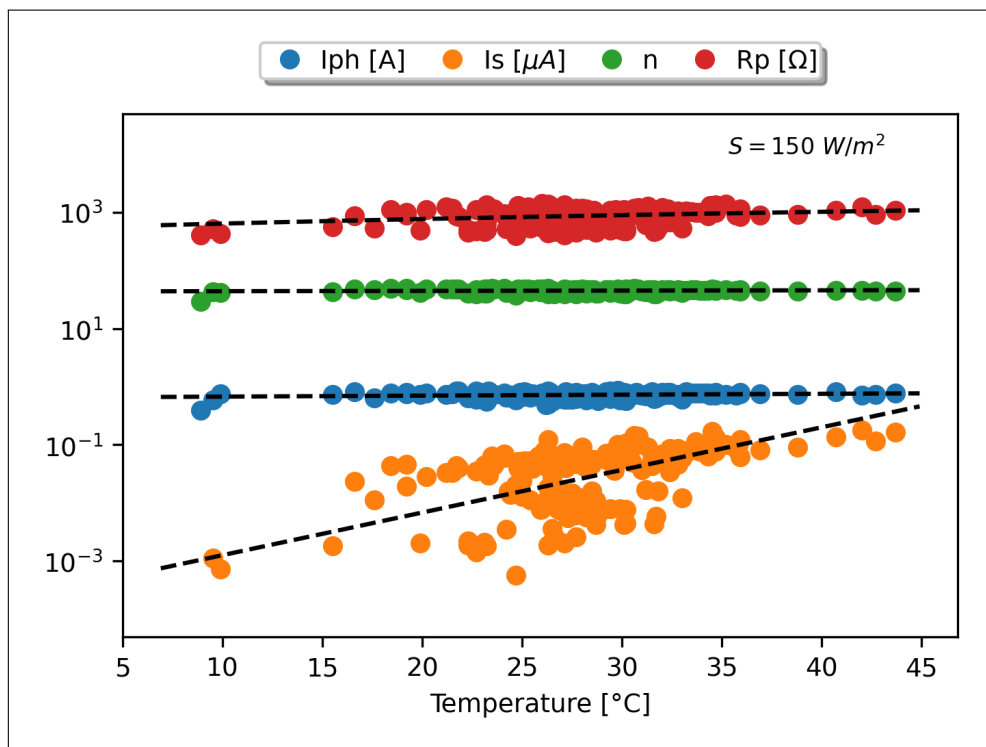


Figure 4.8 — Variations des paramètres du module PV xSi12922 au silicium monocristallin installé à Cocoa pour  $S = 150 \text{ W/m}^2$ . Valeurs mesurées (o) et *fitées* (—).

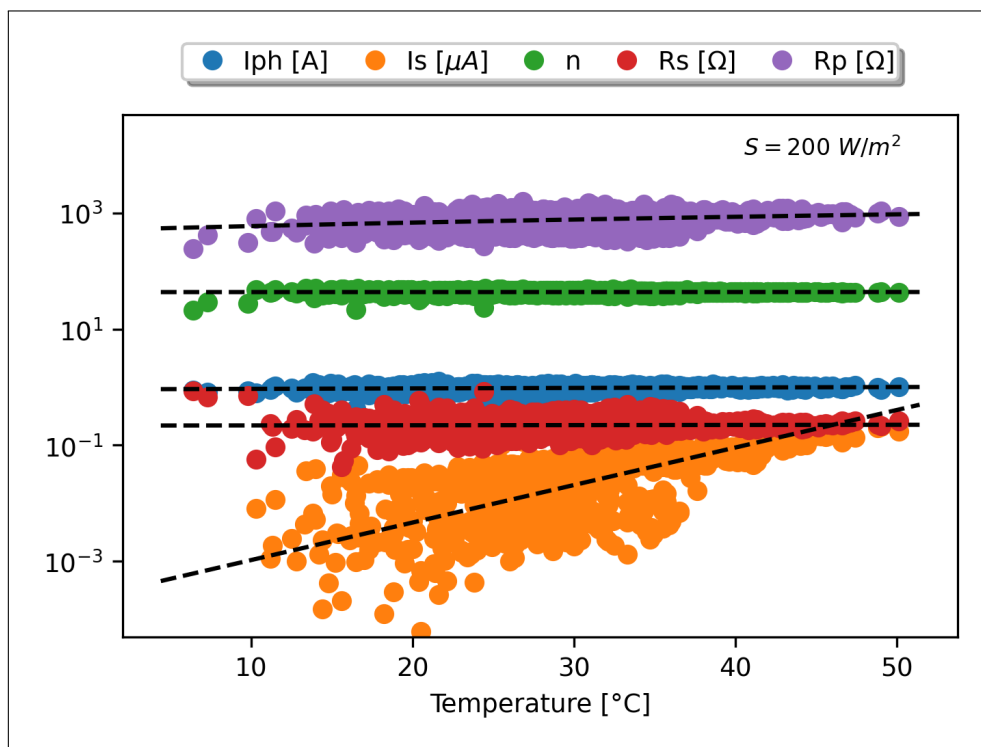


Figure 4.9 — Variations des paramètres du module PV xSi12922 au silicium monocristallin installé à Cocoa pour  $S = 200 \text{ W/m}^2$ . Valeurs mesurées (o) et *fittées* (---).

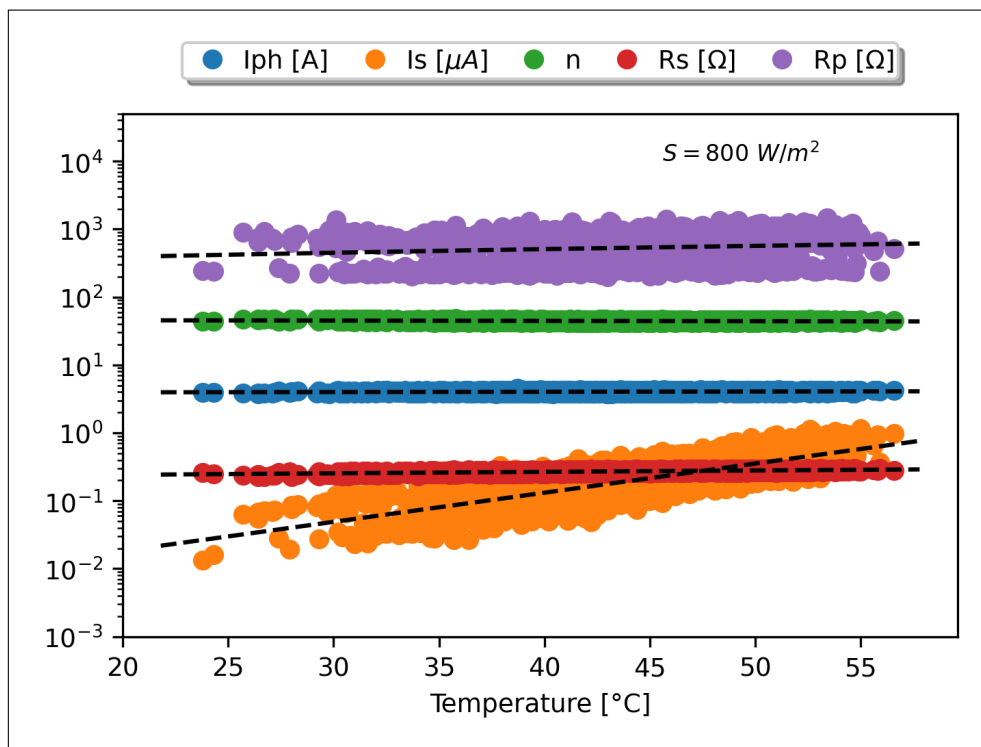


Figure 4.10 — Variations des paramètres du module PV xSi12922 au silicium monocristallin installé à Cocoa pour  $S = 800 \text{ W/m}^2$ . Valeurs mesurées (o) et *fittées* (---).



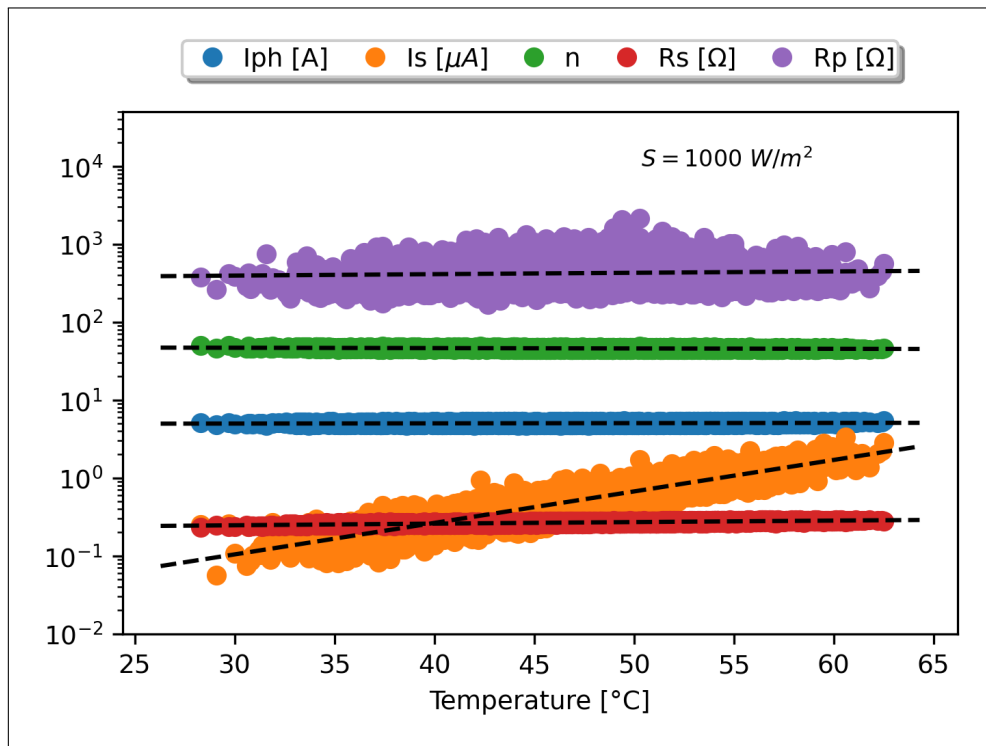


Figure 4.11 — Variations des paramètres du module PV xSi12922 au silicium monocristallin installé à Cocoa pour  $S = 1000 \text{ W/m}^2$ . Valeurs mesurées (o) et *fittées* (—).

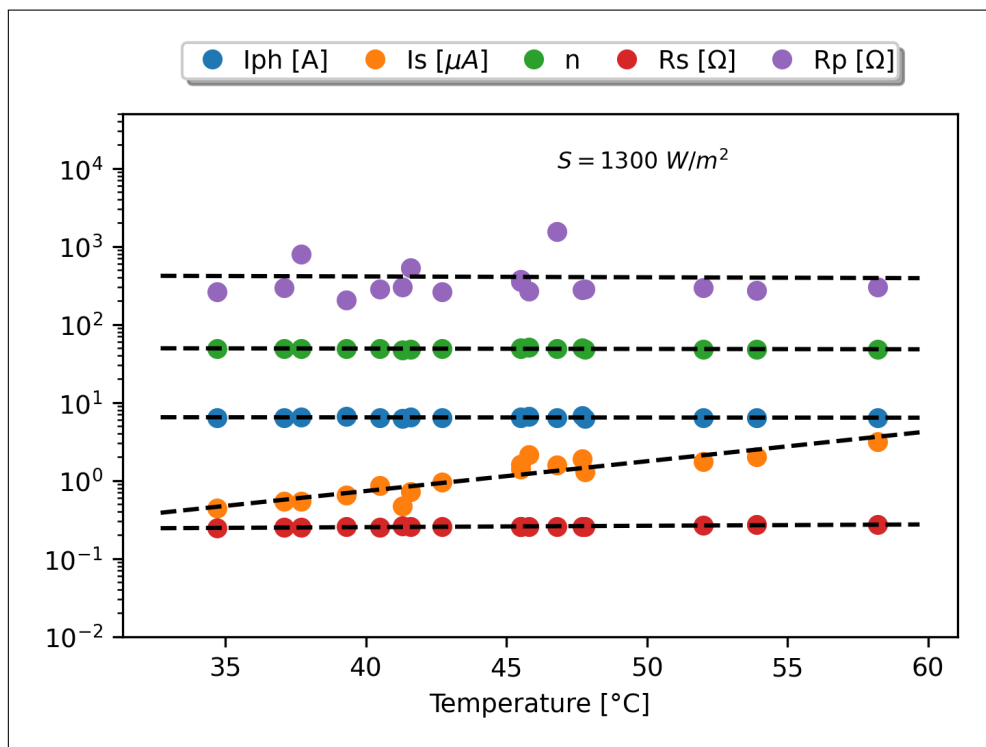


Figure 4.12 — Variations des paramètres du module PV xSi12922 au silicium monocristallin installé à Cocoa pour  $S = 1300 \text{ W/m}^2$ . Valeurs mesurées (o) et *fittées* (—).

### 4.3.2.2 Effet de l'Illumination sur le Module xSi12922 (Cocoa)

Les figures 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 et 4.17 montrent les résultats du *fitting* des paramètres SDMs en fonction de  $S$  pour la température  $T$  variant entre 10 °C et 60 °C. Dans ce qui suit, nous commentons les différents résultats.

#### 4.3.2.2.1 Cas de $I_{ph}$

La figure 4.13 montre clairement que la photo-courant  $I_{ph}$  varie linéairement en fonction de  $S$  pour toutes les températures considérées. Cette tendance attendue est conforme aux résultats publiés dans la littérature et mentionnés dans la table 4.6.

#### 4.3.2.2.2 Cas de $I_s$ et de $n$

Les figures 4.14 et 4.15 montrent respectivement, les variations de  $I_s$  et de  $n$  en fonction de  $S$  pour une température donnée. Il est clair que les variations sont décroissantes jusqu'à une illumination donnée puis deviennent croissantes. L'exploration a montré en plus que le sens de variation dépend de  $T$  : pour  $T < 35^\circ\text{C}$ , l'exponentielle est décroissante et pour  $T > 35^\circ\text{C}$ , elle est croissante comme le montre les figures 4.18 et 4.19 pour  $I_s$  et les figures 4.20 et 4.21 pour  $n$ . Ces figures montrent une difficulté très contraignante de la modélisation des données dispositifs PVs mesurées en *outdoor* : on ne peut pas avoir toutes les températures à toutes les illuminations pour un module PV donné, tout dépend des conditions météorologique, et de ce fait, il est très difficile de trouver un *fitting* global.

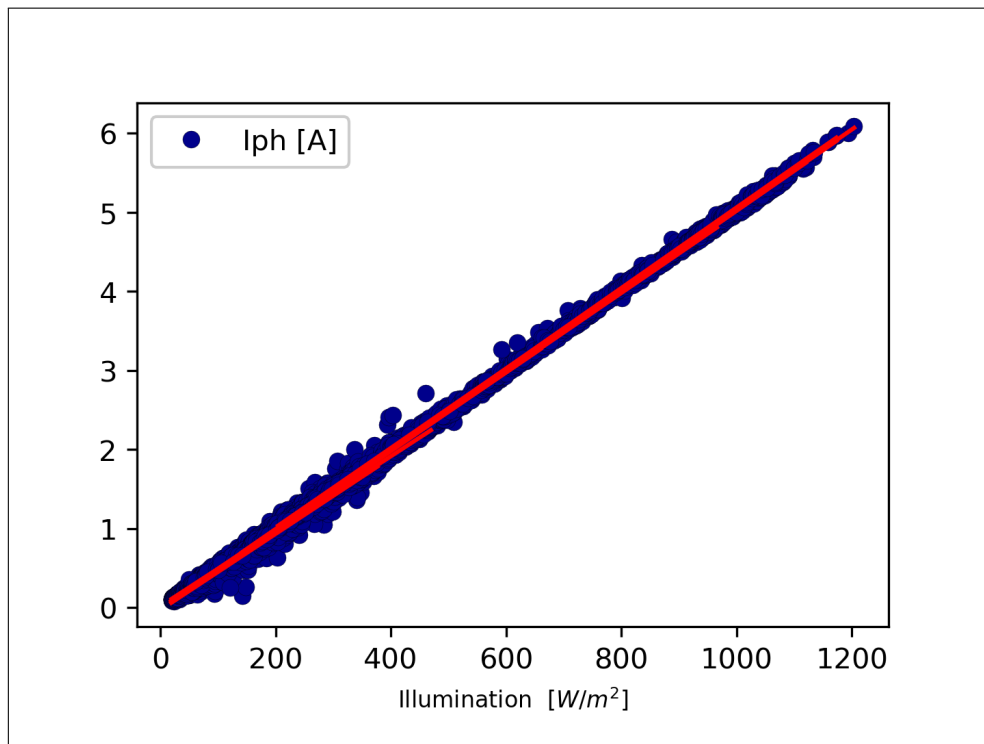
Après plusieurs tests, l'exponentielle qui a donnée le meilleur *fitting* a été celle donnée par la relation :

$$x = a S^c \exp\left(\frac{b}{S^d}\right), \quad [4 - 16] \llcorner$$

où  $x$  représente  $I_s$  ou  $n$  et  $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $d$  sont des paramètres de *fitting*. Par référence à la table 4.6, les variations exponentielles de  $I_s$  et de  $n$  en fonction de l'illumination  $S$  n'ont pas été observées auparavant.

Un deuxième point très important à noter est l'accroissement très accentué de  $I_s$  lorsque  $S$  augmente et pour  $T$  de plus en plus élevée. Ceci va en contradiction avec la théorie de la physique de la cellule solaire qui prévoit une indépendance de  $I_s$  par rapport à  $S$  [4]. Des raisons probables de cette accroissement seraient :

- la diminution de la durée de vie des porteurs,  $\tau_p$ , sous l'effet de  $S$ ,
- la haute injection,
- le couplage entre les effets de  $T$  et de  $S$ ,



**Figure 4.13** — Variations du paramètre  $I_{ph}$  du module PV xSi12922 (Cocoa) en fonction de  $S$  pour  $T = 10 - 60$  °C. Valeurs mesurées (o) et *fitées* (—).

- la concurrence d'un autre phénomène de transport,
- et effet des circuits de connexion des modules.

#### 4.3.2.2.3 Cas de $R_s$

La figure 4.16 montrent que les variations de  $R_s$  en fonction de  $S$  pour une température donnée suivent la même logique de croissance et de décroissance que celle précédemment mentionnée pour  $R_s$  et  $n$ . Les exponentielles ont la forme de l'équation 4-16 et changent de sens de croissance pour  $T = 21$  °C.

Il est à noter que pour  $S > 350$  W/m<sup>2</sup>,  $R_s$  peut être considérée constante. Le problème de croissance et de décroissance est importante pour les valeurs plus faibles de  $S$ . Dans ce cas, le courant  $I_{ph}$  devient faible et l'effet de  $R_s$  est beaucoup plus influant sur le rendement.

#### 4.3.2.2.4 Cas de $R_p$

La figure 4.17 montrent les variations de  $R_p$  en fonction de  $S$  pour une température donnée. Elle suivent une loi exponentielle décroissante selon l'équation 4-16. Pour toutes les températures, la même loi est observée bien que les valeurs trouvées de  $R_p$  soient très dispersées.

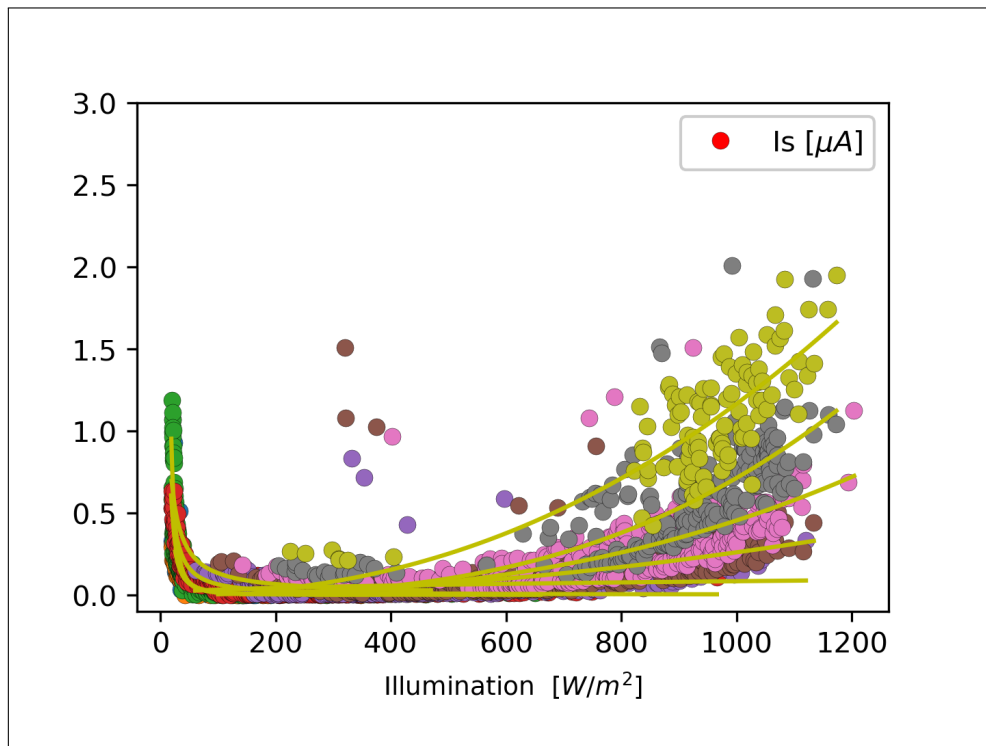


Figure 4.14 — Variations du paramètre  $I_s$  du module PV xSi12922 (Cocoa) en fonction de  $S$  pour  $T = 10 - 60$  °C. Valeurs mesurées (o) et *fittées* (—).

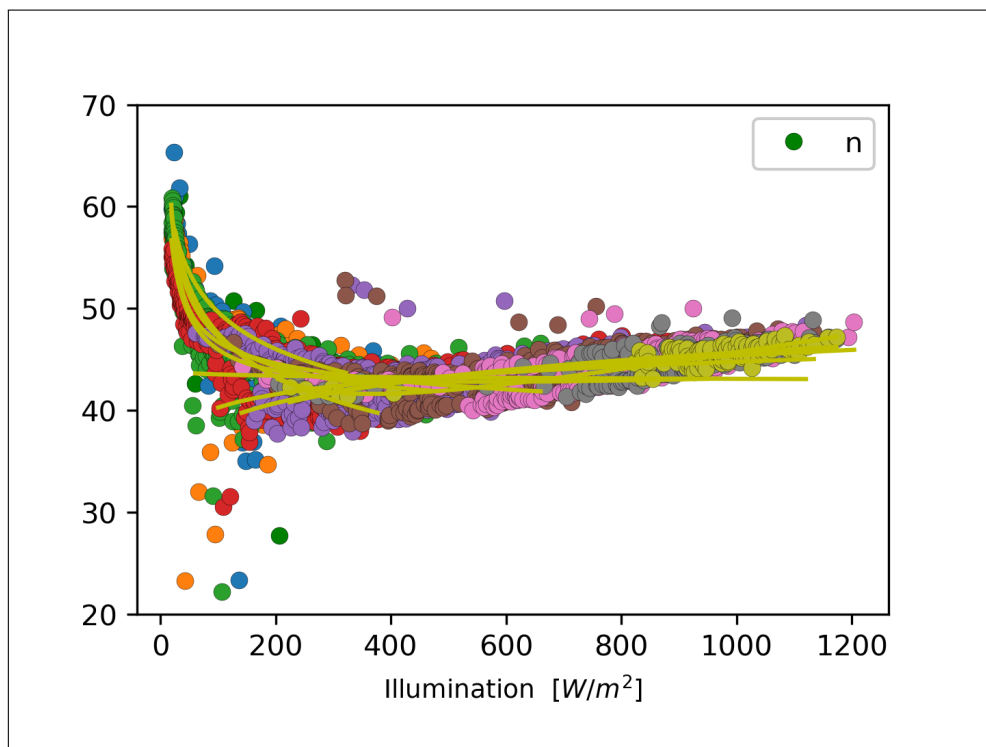


Figure 4.15 — Variations du paramètre  $n$  du module PV xSi12922 (Cocoa) en fonction de  $S$  pour  $T = 10 - 60$  °C. Valeurs mesurées (o) et *fittées* (—).

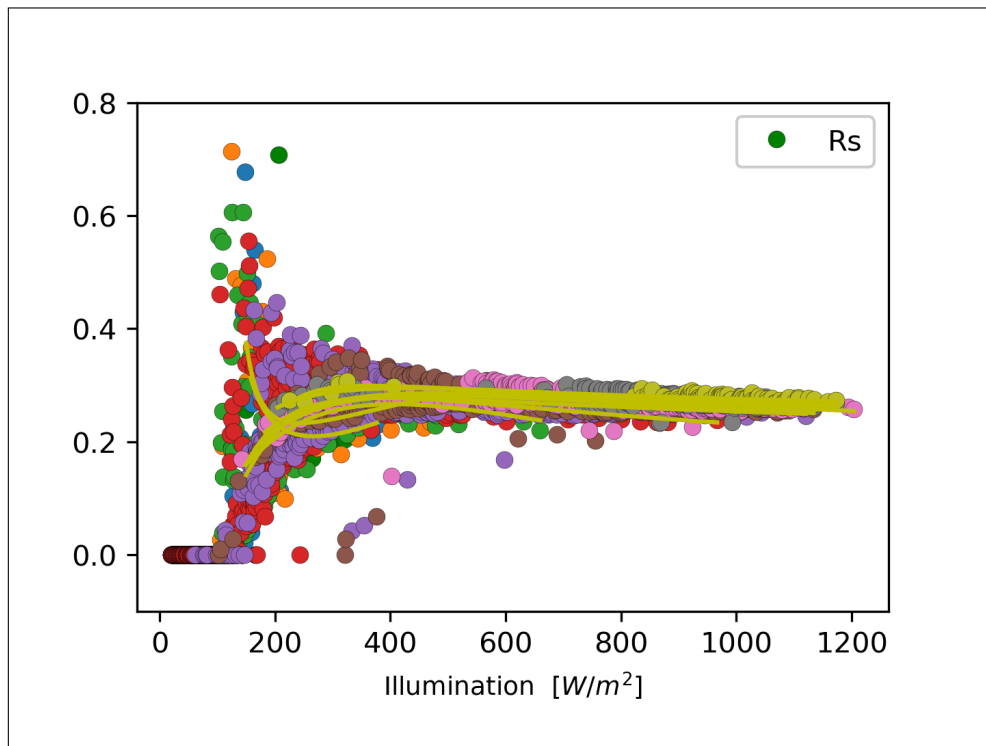


Figure 4.16 — Variations du paramètre  $R_s$  du module PV xSi12922 (Cocoa) en fonction de  $S$  pour  $T = 10 - 60$  °C. Valeurs mesurées (o) et *fitées* (—).

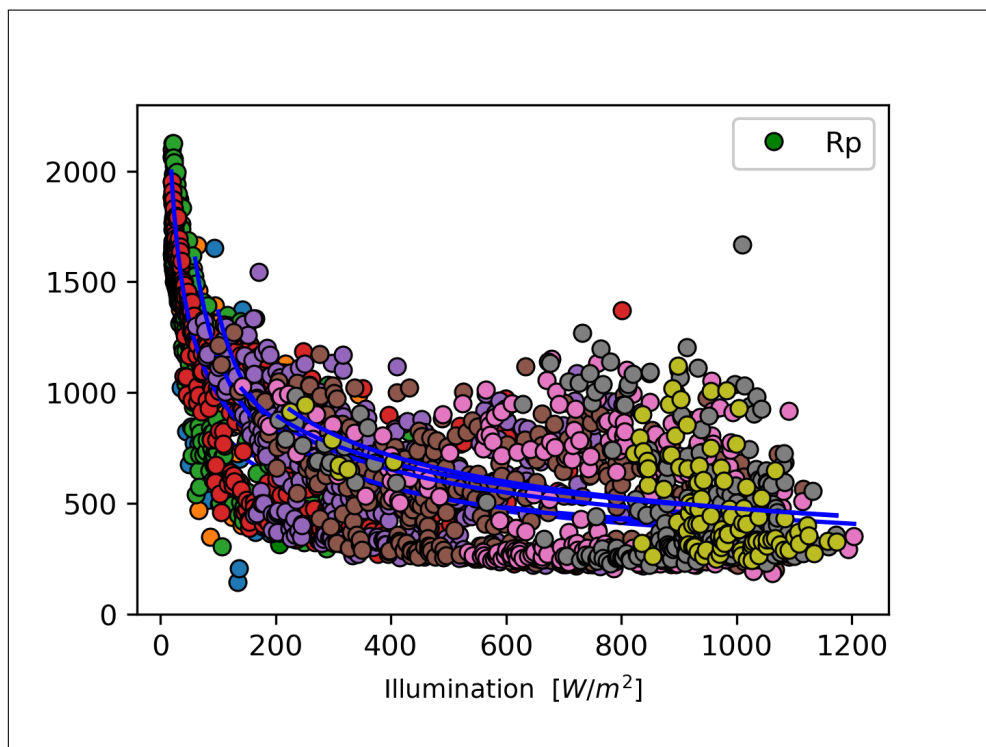


Figure 4.17 — Variations du paramètre  $R_p$  du module PV xSi12922 (Cocoa) en fonction de  $S$  pour  $T = 10 - 60$  °C. Valeurs mesurées (o) et *fitées* (—).

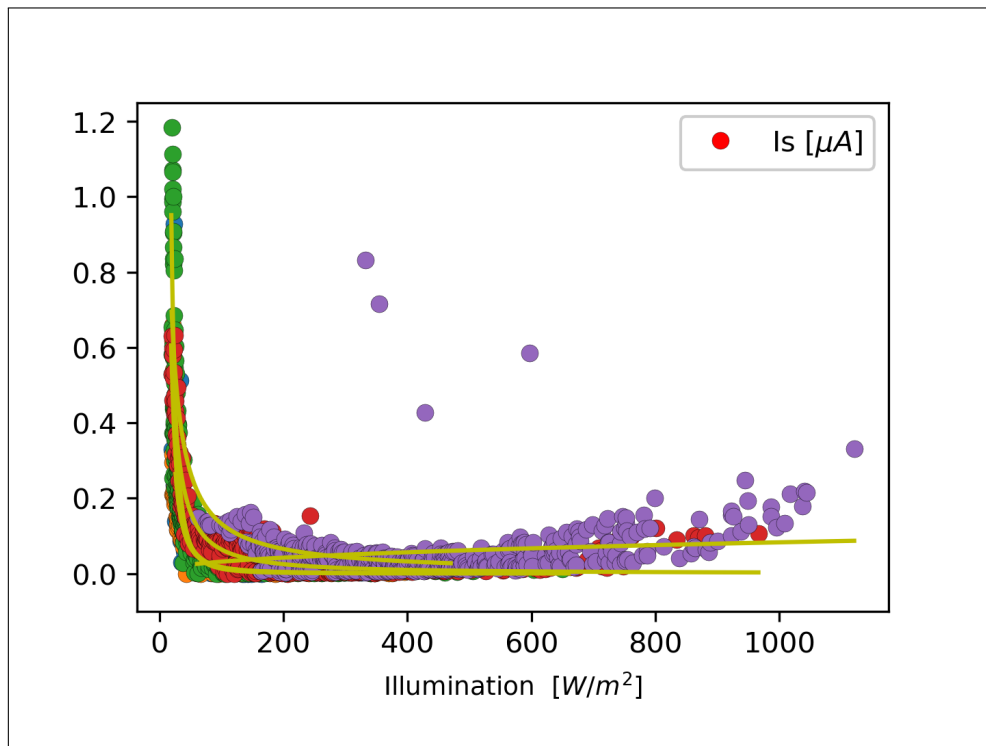


Figure 4.18 — Variations du paramètre  $I_s$  du module PV xSi12922 (Cocoa) en fonction de  $S$  pour  $T = 10 - 35 \text{ }^\circ\text{C}$ . Valeurs mesurées (o) et *fittées* (—).

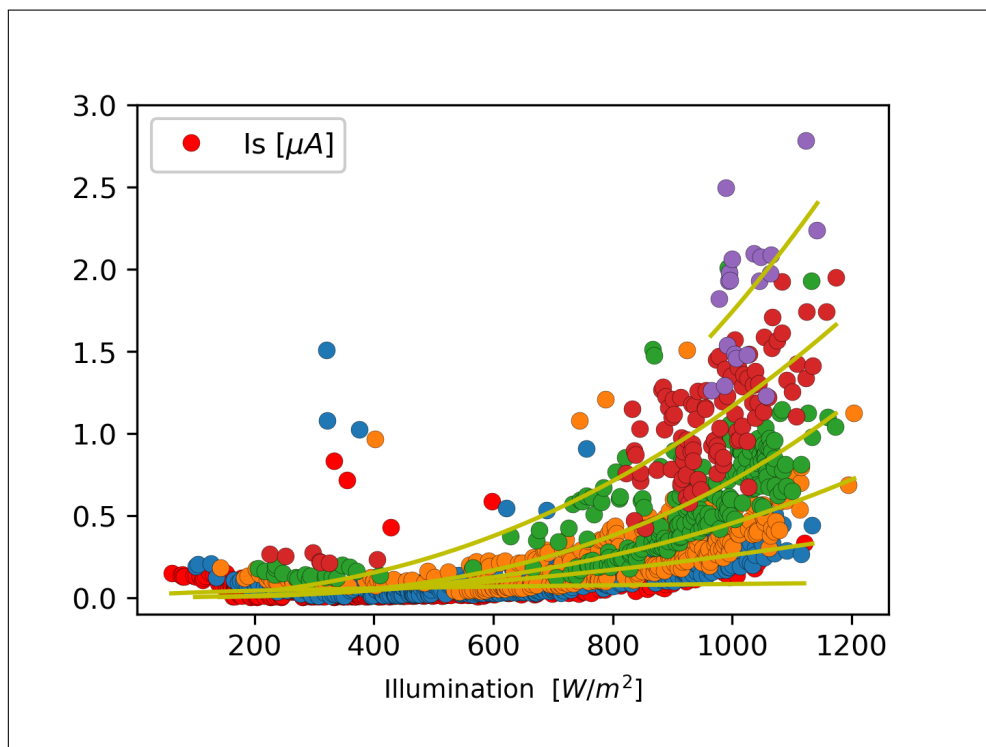


Figure 4.19 — Variations du paramètre  $I_s$  du module PV xSi12922 (Cocoa) en fonction de  $S$  pour  $T = 35 - 60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Valeurs mesurées (o) et *fittées* (—).

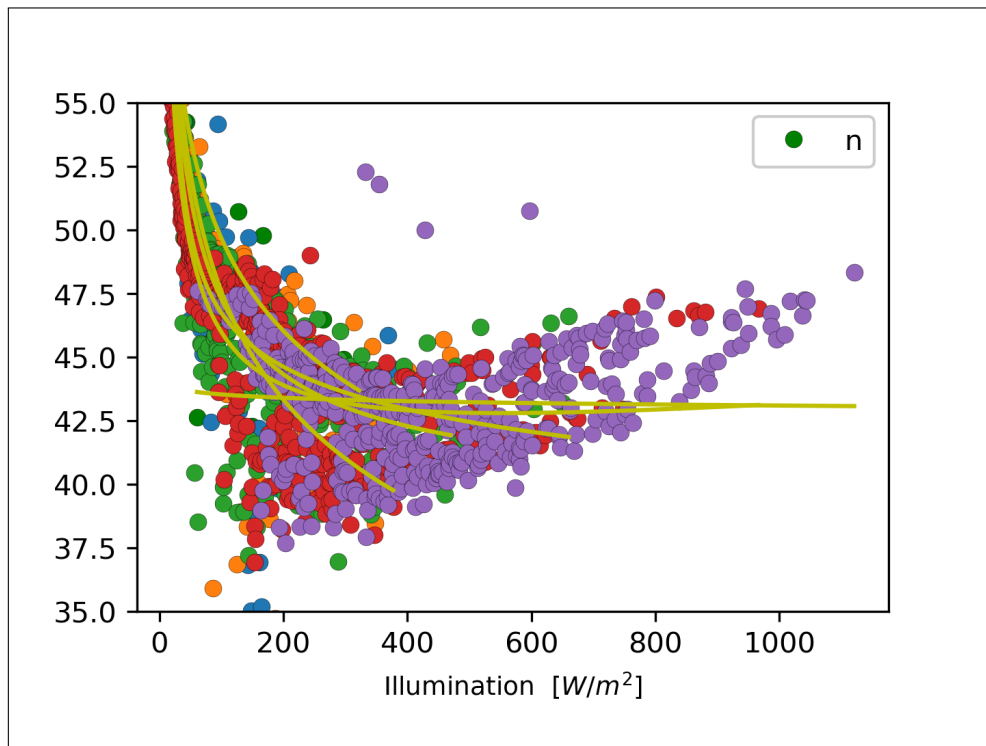


Figure 4.20 — Variations du paramètre  $n$  du module PV xSi12922 (Cocoa) en fonction de  $S$  pour  $T = 10 - 35\text{ }^\circ\text{C}$ . Valeurs mesurées (o) et *fittées* (—).

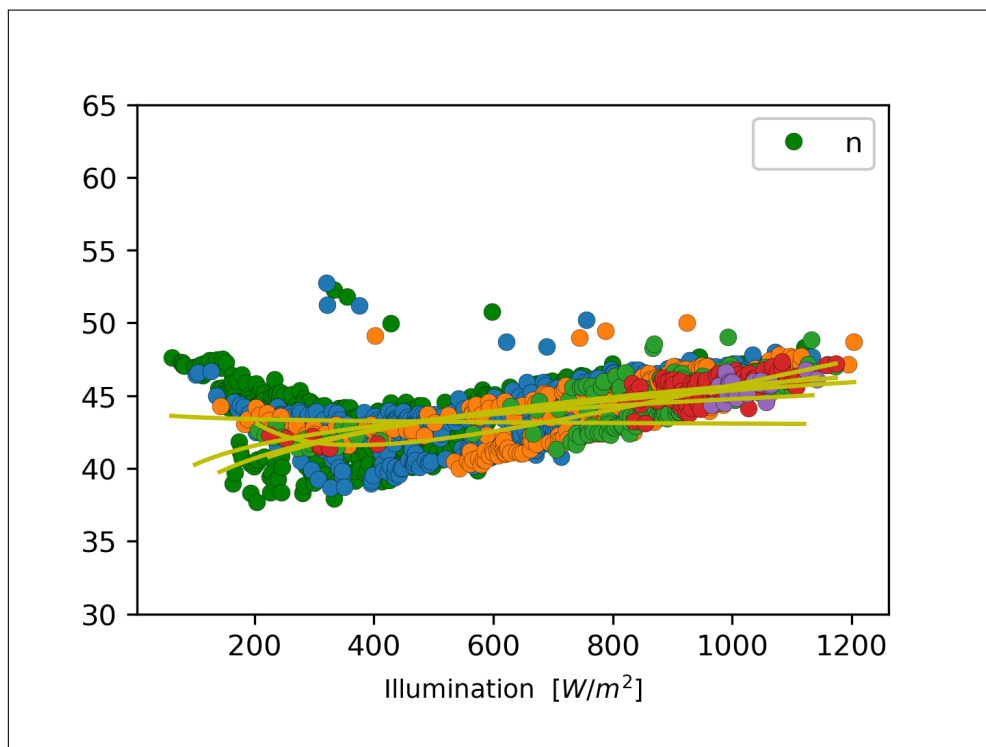


Figure 4.21 — Variations du paramètre  $n$  du module PV xSi12922 (Cocoa) en fonction de  $S$  pour  $T = 35 - 60\text{ }^\circ\text{C}$ . Valeurs mesurées (o) et *fittées* (—).

### 4.3.3 Module mSi0166 (Cocoa)

Le deuxième module PV considéré est le mSi0166 au silicium multicristallin, installé à Cocoa. La procédure d'extraction des cinq paramètres SDM, mentionnée dans le paragraphe 4.3, a été appliquée à toutes les courbes de la base de données (au nombre de 36765 courbes). Les principaux résultats sont détaillés dans ce qui suit.

#### 4.3.3.1 Effet de la Température sur le Module mSi0166 (Cocoa)

Les figures 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, 4.26 et 4.27 montrent les résultats des *fitting* des paramètres  $I_{ph}$ ,  $I_s$ ,  $n$ ,  $R_s$  et  $R_p$  en fonction de  $T$  respectivement pour  $S = 50, 450, 500, 800, 1000$  et  $1300 \text{ W/m}^2$ . Les mêmes observations et le même comportement que le module xSi12922 (voir paragraphe 4.3.2.1) sont à mentionner :

- Pour  $S \leq 450 \text{ W/m}^2$ , on trouve  $R_s = 0 \Omega$ . Le modèle SDMs est réduit à un modèle à 4 paramètres sans  $R_s$  (cas déjà mentionné dans le paragraphe 4.2.3). Ce cas n'a pas été mentionné dans la littérature auparavant.
- $I_s$  suit une loi exponentielle croissante (l'équation 4-15) conforme à la théorie et à ce qu'on trouve dans la littérature (voir la table 4.6).
- Tous les autres paramètres présentent une variation linéaire avec un très faible coefficient de température de sorte que le paramètre en question est considéré constant. Ce comportement est conforme à la théorie et à ce qu'on trouve dans la littérature (voir la table 4.6).



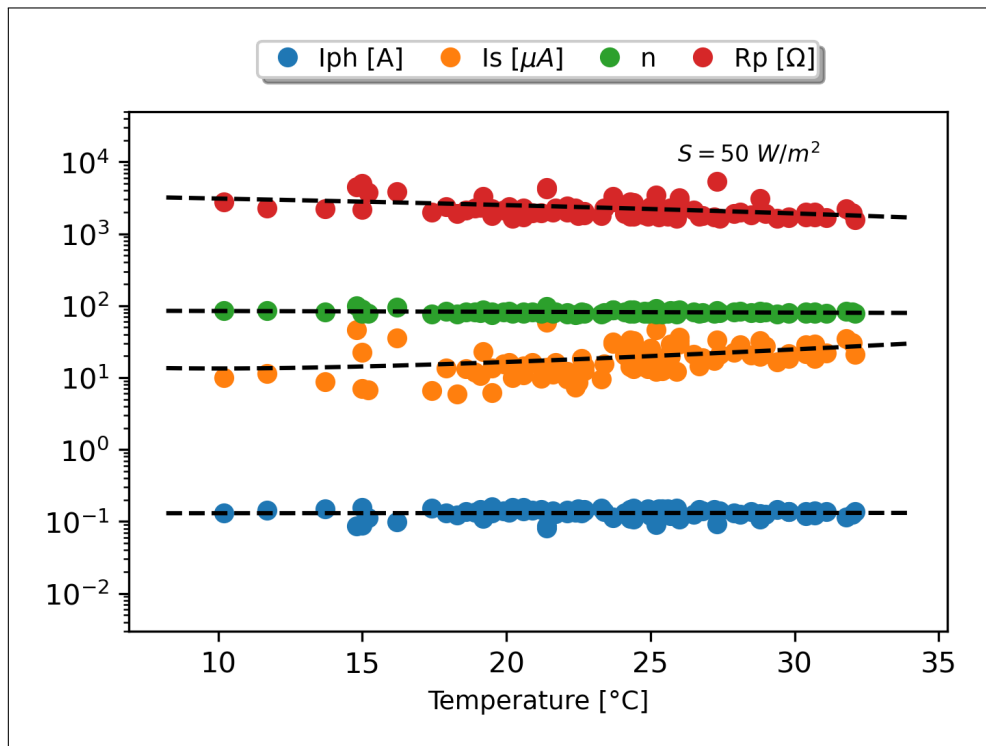


Figure 4.22 — Variations des paramètres du module PV mSi0166 au silicium multicristallin installé à Cocoa pour  $S = 50 \text{ W/m}^2$ .

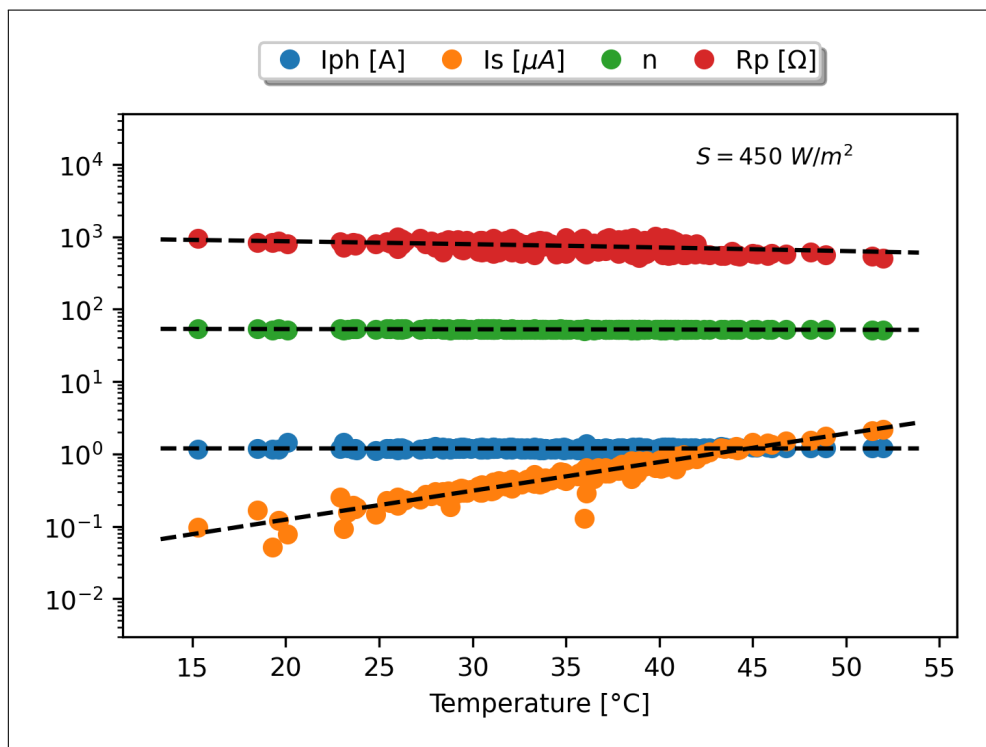


Figure 4.23 — Variations des paramètres du module PV mSi0166 au silicium multicristallin installé à Cocoa pour  $S = 450 \text{ W/m}^2$ .

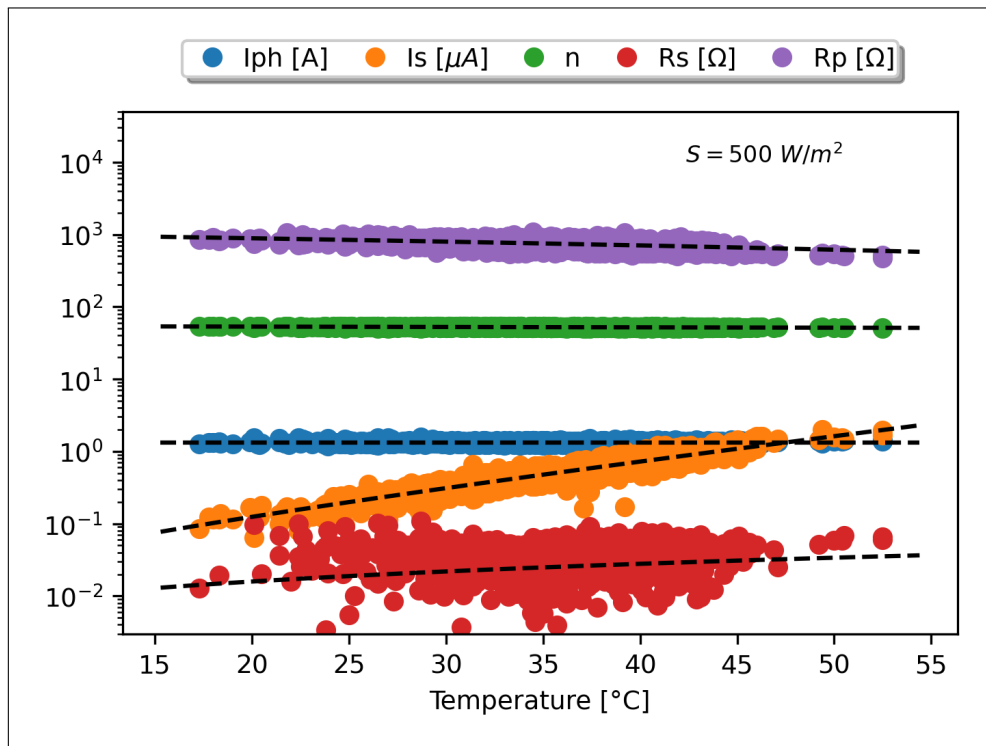


Figure 4.24 — Variations des paramètres du module PV mSi0166 au silicium multicristallin installé à Cocoa pour  $S = 500 \text{ W/m}^2$ .

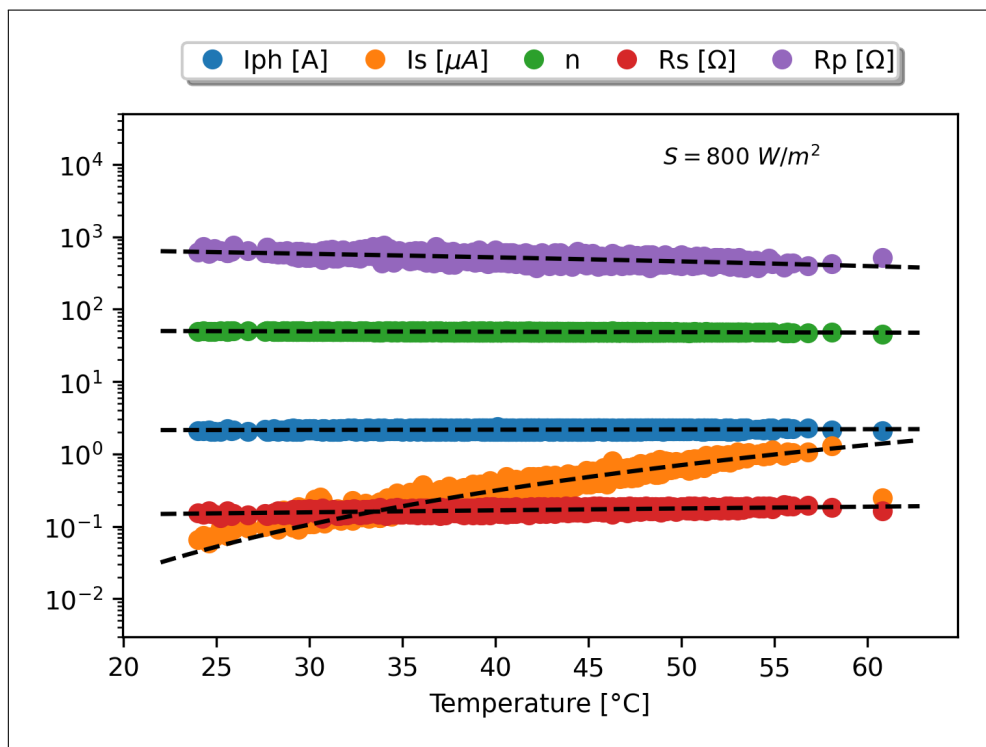


Figure 4.25 — Variations des paramètres du module PV mSi0166 au silicium multicristallin installé à Cocoa pour  $S = 800 \text{ W/m}^2$ .

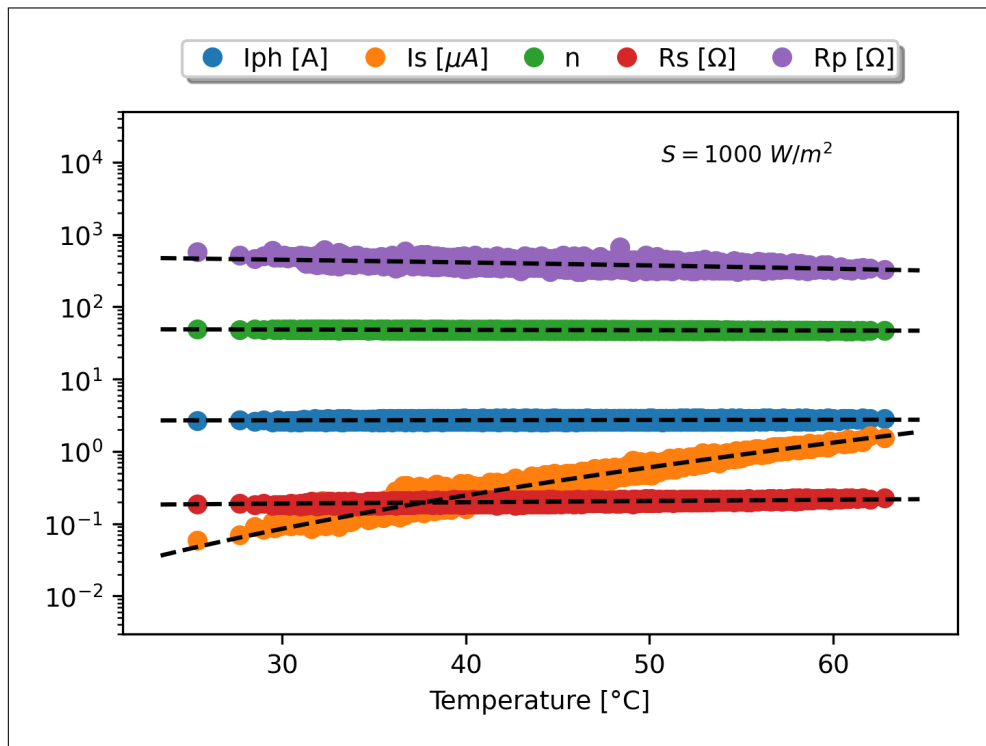


Figure 4.26 — Variations des paramètres du module PV mSi0166 au silicium multicristallin installé à Cocoa pour  $S = 1000 \text{ W/m}^2$ .

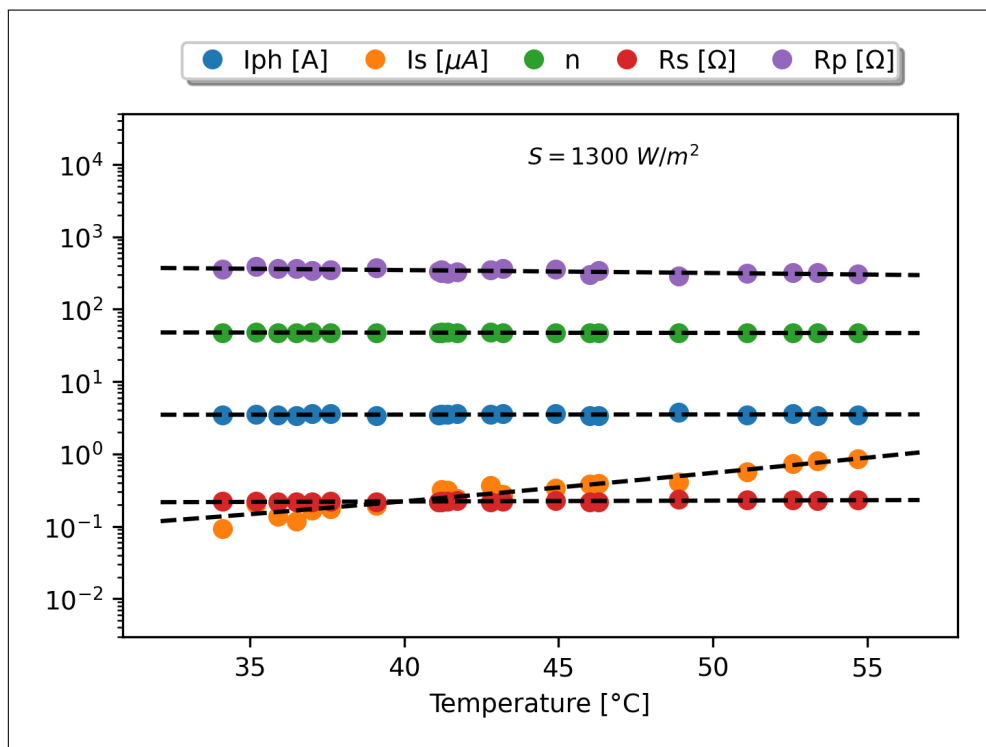


Figure 4.27 — Variations des paramètres du module PV mSi0166 au silicium multicristallin installé à Cocoa pour  $S = 1300 \text{ W/m}^2$ .

### 4.3.3.2 Effet de l'illumination sur le Module mSi0166 (Cocoa)

Les figures 4.28, 4.29, 4.30 et 4.31 montrent les résultats du *fitting* des paramètres SDMs en fonction de  $S$  pour la température  $T$  variant entre  $10\text{ °C}$  et  $60\text{ °C}$ . Dans ce qui suit, nous commentons les différents résultats.

#### 4.3.3.2.1 Cas de $I_{ph}$

La figure 4.28 montre que le photo-courant  $I_{ph}$  varie linéairement en fonction de  $S$  pour toutes les températures considérées, comme prévu par la théorie et confirmé par les résultats publiés dans la littérature (voir la table 4.6).

#### 4.3.3.2.2 Cas de $I_s$ , $n$ et $R_p$

Les figures 4.29 et 4.30 montrent que  $I_s$ ,  $n$  et  $R_p$  prennent la même allure : une décroissance exponentielle (la figure 4-1) jusqu'à  $S \approx 150\text{W/m}^2$  puis prennent une valeur sensiblement constante.

#### 4.3.3.2.3 Cas de $R_s$

La figure 4.31 montre que la résistance série suit une loi exponentielle croissante sur toute l'étendue de  $S$ .

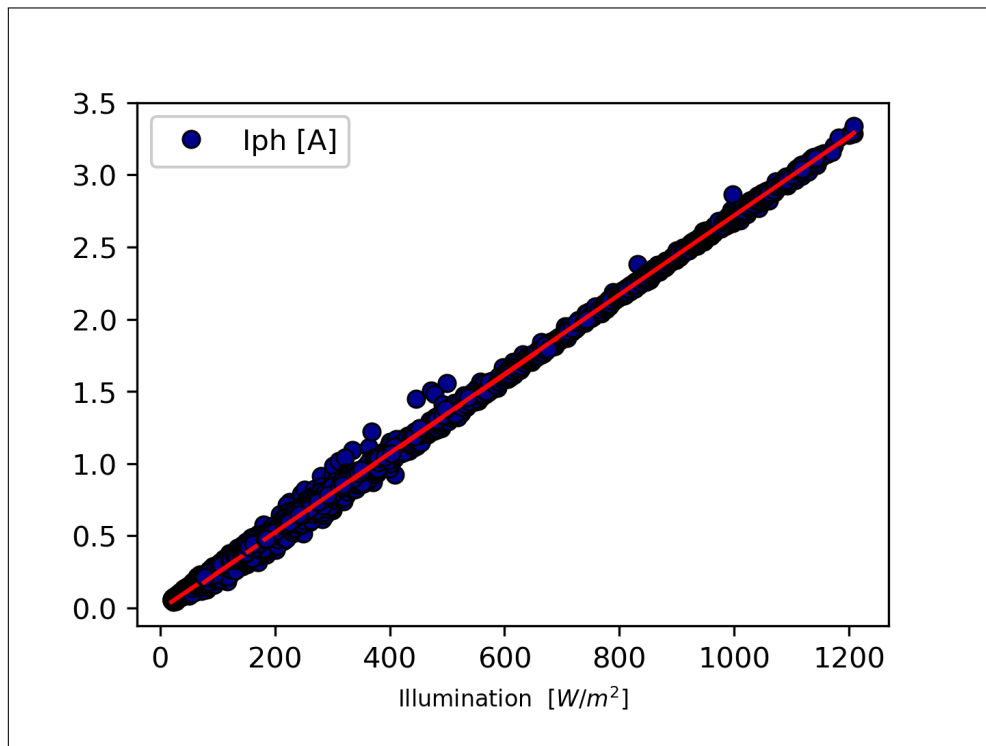


Figure 4.28 — Variations du paramètre  $I_{ph}$  du module PV mSi0166 (Cocoa) en fonction de S pour  $T = 10 - 60$  °C. Valeurs mesurées (o) et *fittées* (—).

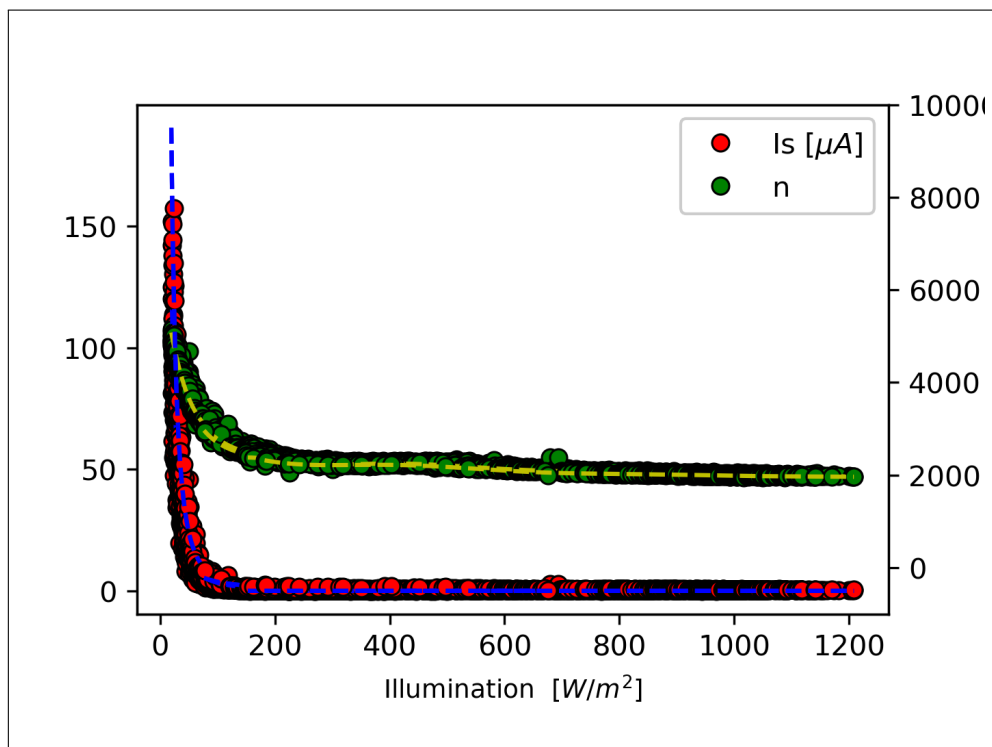


Figure 4.29 — Variations des paramètres  $I_s$  et  $n$  du module PV mSi0166 (Cocoa) en fonction de S pour  $T = 10 - 60$  °C. Valeurs mesurées (o) et *fittées* (—).

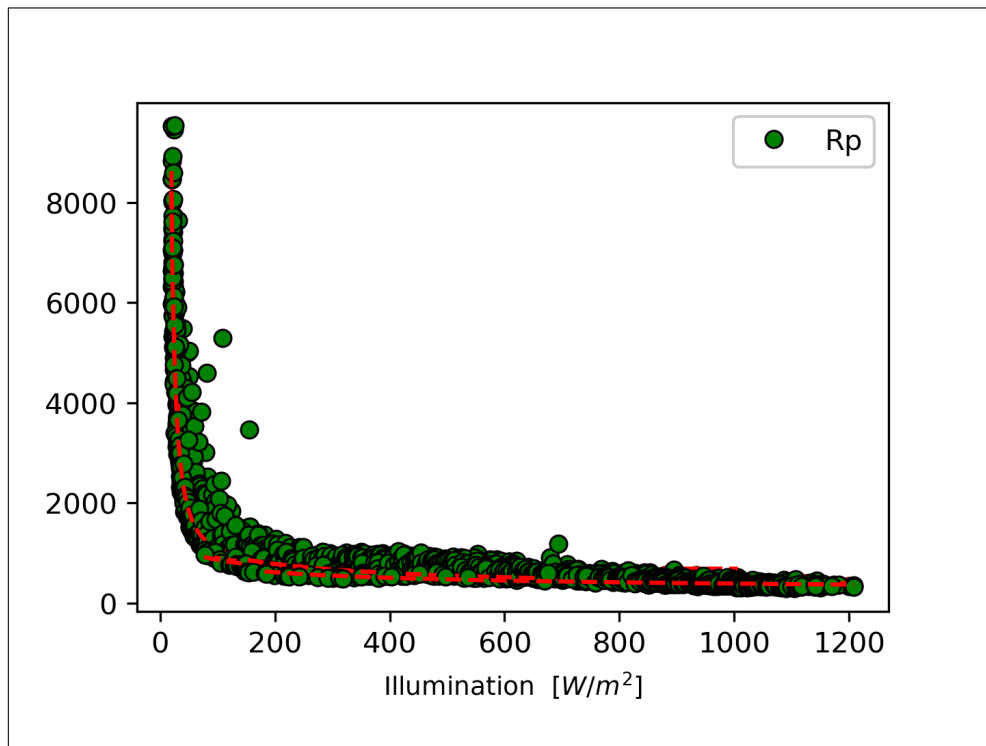


Figure 4.30 — Variations du paramètre  $R_p$  du module PV mSi0166 (Cocoa) en fonction de  $S$  pour  $T = 10 - 60$  °C. Valeurs mesurées (o) et *fitées* (—).

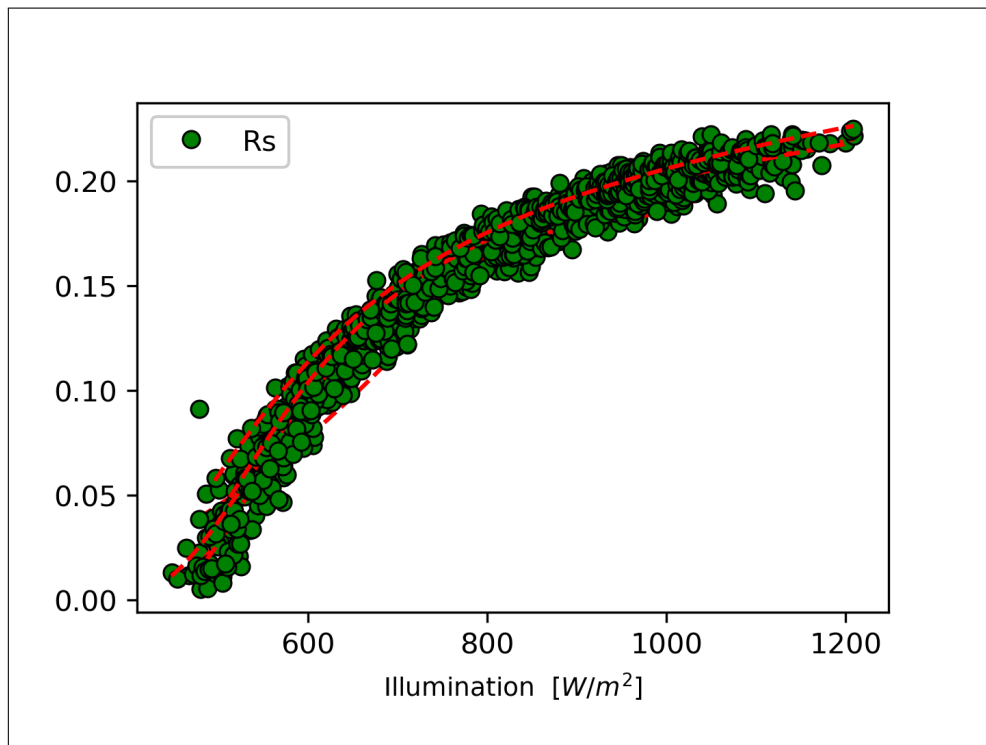


Figure 4.31 — Variations du paramètre  $R_s$  du module PV mSi0166 (Cocoa) en fonction de  $S$  pour  $T = 10 - 60$  °C. Valeurs mesurées (o) et *fitées* (—).

## 4.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une analyse qualitative des données expérimentales de deux (2) **SPs**, l'un cristallin et l'autre multicristallin, d'une base de donnée mise à la disposition des chercheurs par le laboratoire **NREL** [15], collectée *outdoor*. Nous avons appliqué les **GAs** tel que décrits et mis au point au chapitre précédent. Après avoir validé la méthode, et démontré sa haute précision, sur quelques courbes en la comparant à des résultats publiés, nous avons procédé à l'étude des paramètres **SDM** en fonction de T et de S. Les principaux résultats ont été comme suit :

- En fonction de T, les paramètres des deux **SPs** se comportent de la même manière :
  - $I_s$  suit une loi exponentielle croissante.
  - Pour S inférieur à un certain seuil ( $150 \text{ W/m}^2$  pour le **SP** cristallin  $450 \text{ W/m}^2$  pour le multicristallin), on trouve  $R_s = 0 \Omega$ . Ce comportement n'a pas été mentionné dans la littérature.
  - tous les autres paramètres suivent une variation linéaire croissante en fonction de T, conforme aux travaux publiés.
- En fonction de S, à part pour  $I_{ph}$  qui suit une loi linéaire croissante, les autres paramètres présentent des comportements différents pour les deux **SPs** non conformes aux travaux publiés.

Cette étude doit être reprise profondément en considérant les modèles **DDM** et **TDM**.

# Conclusion Générale

\*\*\*\*\*

L'objectif de ce travail était de modéliser les dispositifs photovoltaïques en proposant des méthodes évolutionnaires permettant l'extraction de leurs paramètres électriques à la fois précis et robustes au bruit. Nous avons procédé en trois étapes.

Dans la première étape, nous avons montré la supériorité des algorithmes évolutionnaires, et des algorithmes métaheuristiques en général, par rapport aux méthodes classiques à travers les **GAs**, la **DE** et le **PSO**. En considérant deux fonctions objectifs à minimiser, la **RMSE** et la **VOM**, on a noté que les valeurs des paramètres peuvent varier selon la fonction à optimiser.

Dans la deuxième étape, nous avons utilisé les **GAs** pour extraire les paramètres des dispositifs **PVs** dans un environnement bruité. Le choix des **GAs** a été motivé par le fait que les travaux qui les ont utilisés ont eu pour conclusion de statuer qu'ils ne sont pas recommandés pour l'extraction des paramètres des dispositifs **PVs**. Or, nous avons eu quelques remarques importantes :

- La plupart des travaux utilisent le codage binaire des chromosomes alors que des chercheurs ont mis au point le codage réel **RCGA** mieux adapté aux problèmes à paramètres continus.
- La plupart des travaux utilisent comme opérateur de croisement (*crossover*) l'opérateur uniforme et ses variantes bien qu'il existe d'autres opérateurs beaucoup plus performants.
- La plupart des bibliothèques utilisent par défaut l'opérateur uniforme et le codage binaire.

Nous avons considéré trois opérateurs *crossover* : l'opérateur uniforme (**UXO**), l'opérateur arithmétique (**AXO**) et l'opérateur de fusion (**BXO**). On a procédé à trois niveaux d'applications :

- Dans la première, on a testé la précision des opérateurs en les appliquant à une courbe de référence synthétique.



- Dans la deuxième, on a testé la robustesse en appliquant les opérateurs à des courbes bruitées à un niveau variant de 0% à 10%.
- Dans la troisième, on a validé les méthodes en appliquant les opérateurs à une courbe expérimentale de référence et en comparant les résultats avec des travaux publiés.

Les résultats obtenus montrent que **AXO** et **UXO** souffrent de convergence prématurée. Cet inconvénient fait que la précision obtenue des paramètres est médiocre même si les *fittings* sont bons. De sa part, le **BXO** donne une très haute précision que ce soit pour la courbe synthétique ou pour les courbes bruitées. Pour la courbe expérimentale, les **GAs** avec **BXO** comme opérateur de croisement égalent le record du **RMSE** des méthodes évolutionnaires qu'on trouve dans la littérature [110]. Avec ce résultats, le **BXO** hisse les **GAs** vers la classe des méthodes les plus performantes au contraire de ce qu'en juge les articles de review. Notons cependant que le temps de calcul des **GAs** peut être très grand.

Dans la troisième étape, nous avons utilisé les **GAs** pour modéliser des data de la base de données **NREL** en explorant la variation des paramètres en fonction de la température (T) et de l'illumination (S). En considérant deux **SPs**, l'un cristallin et un l'autre multicristallin, on a trouvé que la variation des paramètres **SDM** en fonction de T suit en général les résultats des travaux publiés. Cependant, pour les illumination faibles (inférieures à un seuil qui varient d'un type de **SP** à un autre), la résistance série  $R_s$  s'annule. Ce comportement n'a pas été noté dans les travaux publiés bien qu'on trouvent dans certains des valeurs très faibles de  $R_s$ . Il devrait être vérifié pour d'autres **SPs**.

Pour la variation en fonction de S on a trouvé qu'elle est, d'une part, différente d'un module à un autre, et d'autre part, qu'elle varie selon la température et/ou l'illumination considérée. Ceci peut être dû à plusieurs raisons dont l'insuffisance du modèle **SDM** ou le couplage entre S et T.

Ce travail peut être complété par l'étude d'autres opérateurs de croisement et d'autre opérateurs génétiques des **GAs** et s'étendre à d'autres méthodes évolutionnaires. Il doit aussi prendre en compte d'autres fonctions objectifs et considérer les modèles **DDM** et **TDM**. Pour les data **NREL**, une analyse plus profonde de la variation des paramètres en fonction de S devrait être conduite en considérant le couplage entre S et T.

# Bibliographie

\*\*\*\*\*

- [1] International Energy Agency, “Renewables Information : Overview,” IEA, Paris, Tech. Rep. Statistics report, 2021, Online at <https://www.iea.org/reports/renewables-information-overview>.
- [2] REN21, “Renewables 2020 Global Status Report,” REN21 Secretariat, Paris, Tech. Rep., 2020, Online at [https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr\\_2020\\_full\\_report\\_en.pdf](https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2020_full_report_en.pdf).
- [3] I. E. Agency, “Trends in Photovoltaic Applications 2019,” IEA-PVPS, Paris, Tech. Rep. Technical Report No. IEA PVPS T1-36 :2019, 2020, Online at <https://iea-pvps.org/wp-content/uploads/2020/02/5319-iea-pvps-report-2019-08-lr.pdf>.
- [4] S. Sze and K. Ng, *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley, 2006.
- [5] D. M. Fébba, E. C. Bortoni, A. F. Oliveira, and R. M. Rubinger, “The Effects of Noises on Metaheuristic Algorithms Applied to the PV Parameter Extraction Problem,” *Solar Energy*, vol. 201, pp. 420 – 436, 2020, DOI <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.093>.
- [6] M. Mitchell, *An Introduction to Genetic Algorithms*. Cambridge, MA, USA : MIT Press, 1998.
- [7] R. Abbassi, A. Abbassi, M. Jemli, and S. Chebbi, “Identification of Unknown Parameters of Solar Cell Models : A Comprehensive Overview of Available Approaches,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 90, pp. 453 – 474, 2018, DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.011>.
- [8] K. Bouzidi, M. Chegaar, and A. Bouhemadou, “Solar Cells Parameters Evaluation Considering the Series and Shunt Resistance,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 91, no. 18, pp. 1647 – 1651, 2007, number : 18. DOI <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2007.05.019>.
- [9] F. Caracciolo, E. Dallago, D. G. Finarelli, A. Liberale, and P. Merhej, “Single-Variable Optimization Method for Evaluating Solar Cell and Solar Module Parameters,” *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 2, no. 2, pp. 173–180, Apr. 2012, number : 2. DOI [10.1109/JPHOTOV.2011.2182181](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2011.2182181).
- [10] X. Ma, W.-H. Huang, E. Schnabel, M. Köhl, J. Brynjarsdóttir, J. L. Braid, and R. H. French, “Data-Driven IV Feature Extraction for Photovoltaic Modules,” *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 9, no. 5, pp. 1405–1412, Sep. 2019, DOI [10.1109/JPHOTOV.2019.2928477](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2928477).

- [11] N. Maouhoub, “Photovoltaic Module Parameter Estimation Using an Analytical Approach and Least Squares Method,” *Journal of Computational Electronics*, vol. 17, no. 2, pp. 784–790, Jun. 2018, number : 2. DOI [10.1007/s10825-017-1121-5](https://doi.org/10.1007/s10825-017-1121-5).
- [12] W. Peng, Y. Zeng, H. Gong, Y. Leng, Y. Yan, and W. Hu, “Evolutionary Algorithm and Parameters Extraction for Dye-Sensitised Solar Cells One-Diode Equivalent Circuit Model,” *Micro Nano Letters*, vol. 8, no. 2, pp. 86–89, Feb. 2013, number : 2. DOI [10.1049/mnl.2012.0806](https://doi.org/10.1049/mnl.2012.0806).
- [13] F. J. Toledo and J. M. Blanes, “Analytical and Quasi-Explicit Four Arbitrary Point Method for Extraction of Solar Cell Single-Diode Model Parameters,” *Renewable Energy*, vol. 92, pp. 346 – 356, 2016, DOI <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.012>.
- [14] T. Easwarakhanthan, J. Bottin, I. Bouhouch, and C. Boutrit, “Nonlinear Minimization Algorithm for Determining the Solar Cell Parameters with Microcomputers,” *International Journal of Solar Energy*, vol. 4, no. 1, pp. 1–12, 1986, number : 1 Publisher : Taylor & Francis \_eprint : <https://doi.org/10.1080/01425918608909835>. DOI [10.1080/01425918608909835](https://doi.org/10.1080/01425918608909835).
- [15] B. Marion, A. Anderberg, C. Deline, J. del Cueto, M. Muller, G. Perrin, J. Rodriguez, S. Rummel, T. J. Silverman, F. Vignola, R. Kessler, J. Peterson, S. Barkaszi, M. Jacobs, N. Riedel, L. Pratt, and B. King, “New Data Set for Validating PV Module Performance Models,” in *2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC)*, June 2014, pp. 1362–1366, DOI [10.1109/PVSC.2014.6925171](https://doi.org/10.1109/PVSC.2014.6925171).
- [16] S. J. Fonash, *Solar Cell Device Physics*, 2nd ed. Boston : Academic Press, 2010, DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374774-7.00022-4>.
- [17] D. M. Chapin, C. S. Fuller, and G. L. Pearson, “A New Silicon *pn* Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power,” *Journal of Applied Physics*, vol. 25, no. 5, pp. 676–677, 05 1954, DOI [10.1063/1.1721711](https://doi.org/10.1063/1.1721711).
- [18] J. Smith, “The History of Solar Energy,” Online at <https://www.solarreviews.com/blog/the-history-of-solar-energy-timeline>.
- [19] “Histoire du Photovoltaïque,” Online at <https://prime-energy-cleantech.ch/media/histoire-du-photovoltaique/>.
- [20] National Renewable Energy Laboratory (NREL), “Best Research-Cell Efficiency Chart,” Online at <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
- [21] NREL, “Reference Air Mass 1.5 Spectra,” Online at <https://www.nrel.gov/grid/solar-resource/spectra-am1.5.html>.
- [22] W. Favre, “Silicium de Type n Pour Cellules à Hétérojonctions : Caractérisations et Modélisations.” Ph.D. dissertation, Université Paris Sud – Paris XI, Paris, France, 2011.
- [23] A. Ferhat Hamida, “Modélisation des Phénomènes de Transport et Étude du Rendement dans les Structures Métal/Isolant/Semiconducteur.” Ph.D. dissertation, FERHAT ABBAS University Sétif 1, Sétif, Algeria, 2006.

- [24] E. Schiller, “Le Pompage Photovoltaïque — Manuel de Cours à l’Intention des Ingénieurs et des Techniciens,” Université d’Ottawa, 1998.
- [25] V. J. Chin, Z. Salam, and K. Ishaque, “Cell Modelling and Model Parameters Estimation Techniques for Photovoltaic Simulator Application : A Review,” *Applied Energy*, vol. 154, pp. 500 – 519, 2015, DOI <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.05.035>.
- [26] D. T. Cotfas, P. A. Cotfas, and S. Kaplanis, “Methods to Determine the DC Parameters of Solar Cells : A Critical Review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 28, pp. 588 – 596, 2013, DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.017>.
- [27] A. M. Humada, M. Hojabri, S. Mekhilef, and H. M. Hamada, “Solar Cell Parameters Extraction Based on Single and Double-Diode Models : A Review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 56, pp. 494 – 509, 2016, DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.051>.
- [28] Z. Bendjellouli, “Contribution à la Modélisation d’une Cellule Solaire,” Magister dissertation, Bechar University, Algeria, 2009.
- [29] Y. Zhang, P. Hao, H. Lu, J. Ma, and M. Yang, “Modelling and Estimating Performance for PV Module Under Varying Operating Conditions Independent of Reference Condition,” *Applied Energy*, vol. 310, p. 118527, 2022, DOI <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.118527>.
- [30] A. A. Elbaset, H. Ali, and M. Abd-El Sattar, “Novel Seven-Parameter Model for Photovoltaic Modules,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 130, pp. 442–455, 2014, DOI <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2014.07.016>.
- [31] A. Jain and A. Kapoor, “Exact Analytical Solutions of the Parameters of Real Solar Cells Using Lambert W-Function,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 81, no. 2, pp. 269–277, 2004, DOI <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2003.11.018>.
- [32] E. Batzelis, “Non-Iterative Methods for the Extraction of the Single-Diode Model Parameters of Photovoltaic Modules : A Review and Comparative Assessment,” *Energies*, vol. 12, no. 3, p. 358, Jan. 2019, number : 3 Publisher : MDPI AG. DOI [10.3390/en12030358](https://doi.org/10.3390/en12030358).
- [33] A. R. Jordehi, “Parameter Estimation of Solar Photovoltaic (PV) Cells : A Review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 61, pp. 354 – 371, 2016, DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.03.049>.
- [34] M. Bashahu and P. Nkundabakura, “Review and Tests of Methods for the Determination of the Solar Cell Junction Ideality Factors,” *Solar Energy*, vol. 81, no. 7, pp. 856 – 863, 2007, number : 7. DOI <https://doi.org/10.1016/j.solener.2006.11.002>.
- [35] M. Bashahu and A. Habyarimana, “Review and Test of Methods for Determination of the Solar Cell Series Resistance,” *Renewable Energy*, vol. 6, no. 2, pp. 129 – 138, 1995, number : 2. DOI [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(94\)E0021-V](https://doi.org/10.1016/0960-1481(94)E0021-V).
- [36] S. Bader, X. Ma, and B. Oelmann, “One-Diode Photovoltaic Model Parameters at Indoor Illumination Levels A Comparison,” *Solar Energy*, vol. 180, pp. 707 – 716, 2019, DOI <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.048>.

- [37] N. Anani and H. Ibrahim, "Performance Evaluation of Analytical Methods for Parameters Extraction of Photovoltaic Generators," *Energies*, vol. 13, no. 18, 2020, DOI [10.3390/en13184825](https://doi.org/10.3390/en13184825).
- [38] M. Wolf and H. Rauschenbach, "Series Resistance Effects on Solar Cell Measurements," *Advanced Energy Conversion*, vol. 3, no. 2, pp. 455–479, 1963, DOI [https://doi.org/10.1016/0365-1789\(63\)90063-8](https://doi.org/10.1016/0365-1789(63)90063-8).
- [39] W. T. Picciano, "Determination of the Solar Cell Equation Parameters, Including Series Resistance, from Empirical Data," *Energy Conversion*, vol. 9, no. 1, pp. 1–6, 1969, DOI [https://doi.org/10.1016/0013-7480\(69\)90077-1](https://doi.org/10.1016/0013-7480(69)90077-1).
- [40] J. Phang, D. Chan, and J. Phillips, "Accurate Analytical Method for the Extraction of Solar Cell Model Parameters," *Electronics Letters*, vol. 20, no. 1, pp. 406–408, 1984, DOI <https://doi.org/10.1049/el:19840281>.
- [41] J. Charles, M. Abdelkrim, Y. Muoy, and P. Mialhe, "A Practical Method of Analysis of the Current-Voltage Characteristics of Solar Cells," *Solar Cells*, vol. 4, no. 2, pp. 169–178, 1981, DOI [https://doi.org/10.1016/0379-6787\(81\)90067-3](https://doi.org/10.1016/0379-6787(81)90067-3).
- [42] K. L. Kennerud, "Analysis of Performance Degradation in Cds Solar Cells," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-5, no. 6, pp. 912–917, 1969, DOI [10.1109/TAES.1969.309966](https://doi.org/10.1109/TAES.1969.309966).
- [43] J. H. Werner, "Schottky Barrier and pn-Junction I/V Plots Small Signal Evaluation," *Appl. Phys. A*, vol. 47, no. 3, pp. 291–300, Nov. 1988, DOI [10.1007/BF00615935](https://doi.org/10.1007/BF00615935).
- [44] Z. Ouennoughi and M. Chegaar, "A Simpler Method for Extracting Solar Cell Parameters Using the Conductance Method," *Solid-State Electronics*, vol. 43, no. 11, pp. 1985–1988, 1999, DOI [https://doi.org/10.1016/S0038-1101\(99\)00174-4](https://doi.org/10.1016/S0038-1101(99)00174-4).
- [45] H. Norde, "A Modified Forward IV Plot for Schottky Diodes with High Series Resistance," *Journal of Applied Physics*, vol. 50, no. 7, pp. 5052–5053, 07 1979, DOI [10.1063/1.325607](https://doi.org/10.1063/1.325607).
- [46] V. Aubry and F. Meyer, "Schottky Diodes with High Series Resistance : Limitations of Forward IV Methods," *Journal of Applied Physics*, vol. 76, no. 12, pp. 7973–7984, Dec. 1994, DOI [10.1063/1.357909](https://doi.org/10.1063/1.357909).
- [47] O. Y. Olikh, "Review and Test of Methods for Determination of the Schottky Diode Parameters," *Journal of Applied Physics*, vol. 118, no. 2, p. 024502, 07 2015, DOI [10.1063/1.4926420](https://doi.org/10.1063/1.4926420).
- [48] N. Nehaoua, Y. Chergui, and D. Mekki, "Determination of Organic Solar Cell Parameters Based on Single or Multiple *pin* Structures," *Vacuum*, vol. 84, no. 2, pp. 326–329, 2009, DOI <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2009.07.006>.
- [49] M. Chegaar, Z. Ouennoughi, and F. Guechi, "Extracting Dc Parameters of Solar Cells Under Illumination," *Vacuum*, vol. 75, no. 4, pp. 367–372, 2004, DOI <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2004.05.001>.

- [50] A. Kaminski, J. Marchand, and A. Laugier, “Non Ideal Dark IV Curves Behavior of Silicon Solar Cells,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 51, no. 3, pp. 221–231, 1998, DOI [https://doi.org/10.1016/S0927-0248\(97\)00216-X](https://doi.org/10.1016/S0927-0248(97)00216-X).
- [51] 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 IV Characteristics,” *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 90, no. 3, pp. 352–361, 2006, DOI <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.04.023>.
- [52] A. Ferhat-Hamida, Z. Ouenoughi, A. Hoffmann, and R. Weiss, “Extraction of Schottky Diode Parameters Including Parallel Conductance Using a Vertical Optimization Method,” *Solid-State Electronics*, vol. 46, no. 5, pp. 615 – 619, 2002, number : 5. DOI [https://doi.org/10.1016/S0038-1101\(01\)00337-9](https://doi.org/10.1016/S0038-1101(01)00337-9).
- [53] A. Ortiz-Conde, Y. Ma, J. Thomson, E. Santos, J. J. Liou, F. J. G. Sánchez, M. Lei, J. Finol, and P. Layman, “Direct Extraction of Semiconductor Device Parameters Using Lateral Optimization Method,” *Solid-State Electronics*, vol. 43, no. 4, pp. 845 – 848, 1999, number : 4. DOI [https://doi.org/10.1016/S0038-1101\(99\)00044-1](https://doi.org/10.1016/S0038-1101(99)00044-1).
- [54] Bilal, M. Pant, H. Zaheer, L. Garcia-Hernandez, and A. Abraham, “Differential Evolution : A Review of More Than Two Decades of Research,” *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 90, p. 103479, 2020, DOI <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2020.103479>.
- [55] J. H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems : An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*. Ann Arbor, MI, USA : University of Michigan Press, 1975.
- [56] K. Soleimani and J. Mazloum, “Designing a GA-Based Robust Controller for Load Frequency Control (LFC),” *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 8, no. 2, pp. 2633–2639, Apr. 2018, number : 2 Section : Articles. DOI [10.48084/etasr.1592](https://doi.org/10.48084/etasr.1592).
- [57] V. H. Nguyen, H. Nguyen, M. T. Cao, and K. H. Le, “Performance Comparison Between PSO and GA in Improving Dynamic Voltage Stability in ANFIS Controllers for STATCOM,” *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 9, no. 6, pp. 4863–4869, Dec. 2019, number : 6 Section : Articles. DOI [10.48084/etasr.3032](https://doi.org/10.48084/etasr.3032).
- [58] E. Jamalain and R. Foukerdi, “A Hybrid Data Mining Method for Customer Churn Prediction,” *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 8, no. 3, pp. 2991–2997, Jun. 2018, number : 3 Section : Articles. DOI [10.48084/etasr.2108](https://doi.org/10.48084/etasr.2108).
- [59] J. Kingdon and K. Feldman, “Genetic Algorithms and Applications to Finance,” *Applied Mathematical Finance*, vol. 2, no. 2, pp. 89–116, 1995, number : 2 Publisher : Routledge \_eprint : <https://doi.org/10.1080/13504869500000006>. DOI [10.1080/13504869500000006](https://doi.org/10.1080/13504869500000006).
- [60] R. Drechsler, *Evolutionary Algorithms for VLSI CAD*. USA : Kluwer Academic Publishers, 1998.
- [61] R. Drechsler and N. Drechsler, *Evolutionary Algorithms for Embedded System Design*. USA : Kluwer Academic Publishers, 2002.

- [62] V. Kumar and S. K. Dhull, "Genetic Algorithm Based Optimization of Uniform Circular Array," *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 10, no. 6, pp. 6403–6409, Dec. 2020, number : 6 Section : Articles. DOI [10.48084/etasr.3792](https://doi.org/10.48084/etasr.3792).
- [63] M. Abdul-Niby, M. Alameen, A. Salhieh, and A. Radhi, "Improved Genetic and Simulating Annealing Algorithms to Solve the Traveling Salesman Problem Using Constraint Programming," *Eng. Technol. Appl. Sci. Res.*, vol. 6, no. 2, pp. 927–930, Apr. 2016, number : 2 Section : Articles. DOI [10.48084/etasr.627](https://doi.org/10.48084/etasr.627).
- [64] D. E. Goldberg, *Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning*. New York : Addison-Wesley, 1989.
- [65] A. Eiben and J. Smith, *Introduction to Evolutionary Computing*, 2nd ed., ser. Natural Computing Series. Springer Berlin Heidelberg, 2015.
- [66] E. Wirsansky, *Hands-On Genetic Algorithms with Python : Applying Genetic Algorithms to Solve Real-World Deep Learning and Artificial Intelligence Problems*. Packt Publishing, 2020.
- [67] A. Sorsa, R. Peltokangas, and K. Leiviska, "Real-Coded Genetic Algorithms and Nonlinear Parameter Identification," in *2008 4th International IEEE Conference Intelligent Systems*, vol. 2, Sep. 2008, pp. 10–42–10–47, iISSN : 1941-1294. DOI [10.1109/IS.2008.4670495](https://doi.org/10.1109/IS.2008.4670495).
- [68] S. Katoch, S. S. Chauhan, and V. Kumar, "A Review on Genetic Algorithm : Past, Present, and Future," *Multimedia Tools and Applications*, vol. 80, no. 5, pp. 8091–8126, Feb 01, 2021, DOI [10.1007/s11042-020-10139-6](https://doi.org/10.1007/s11042-020-10139-6).
- [69] P. K. Singh, "A Modified Real-Coded Extended Line Crossover for Genetic Algorithm," in *Social Transformation Digital Way*, ser. Communications in Computer and Information Science, J. K. Mandal and D. Sinha, Eds. Singapore : Springer, 2018, pp. 702–716, DOI [10.1007/978-981-13-1343-1\\_58](https://doi.org/10.1007/978-981-13-1343-1_58).
- [70] F. Herrera, M. Lozano, and A. M. Sánchez, "A Taxonomy for the Crossover Operator for Real-Coded Genetic Algorithms : An Experimental Study," *International Journal of Intelligent Systems*, vol. 18, no. 3, pp. 309–338, 2003, number : 3 \_eprint : <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/int.10091>. DOI <https://doi.org/10.1002/int.10091>.
- [71] R. Storn and K. Price, "Differential Evolution - A Simple and Efficient Adaptive Scheme for Global Optimization over Continuous Spaces," ICSI, Tech. Rep. TR-95-012, march 1995, Online at <ftp://icsi.berkeley.edu/pub/techreports/1995/tr-95-012.ps.Z>.
- [72] —, "Differential Evolution – A Simple and Efficient Heuristic for Global Optimization over Continuous Spaces," *Journal of Global Optimization*, vol. 11, no. 4, pp. 341–359, Dec 01, 1997, DOI [10.1023/A:1008202821328](https://doi.org/10.1023/A:1008202821328).
- [73] K. Price and R. Storn, "Differential Evolution - A Simple Evolution Strategy for Fast Optimization," *Dr. Dobbs Journal*, vol. 22, no. 4, pp. 18–24, 78, 1997.

- [74] K. V. Price, "An Introduction to Differential Evolution," in *New ideas in optimization*, M. Corne, David Dorigo, F. Glover, D. Dasgupta, P. Moscato, R. Poli, and K. V. Price, Eds. UK : McGraw-Hill Ltd., 1999.
- [75] J. Ilonen, J.-K. Kamarainen, and J. Lampinen, "Differential Evolution Training Algorithm for Feed-Forward Neural Networks," *Neural Processing Letters*, vol. 17, no. 1, pp. 93–105, Feb 01, 2003, DOI [10.1023/A:1022995128597](https://doi.org/10.1023/A:1022995128597).
- [76] R. Storn, "On the Usage of Differential Evolution for Function Optimization," in *Proceedings of North American Fuzzy Information Processing*, June 1996, pp. 519–523, DOI [10.1109/NAFIPS.1996.534789](https://doi.org/10.1109/NAFIPS.1996.534789).
- [77] R. Joshi and A. Sanderson, "Minimal Representation Multisensor Fusion Using Differential Evolution," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A : Systems and Humans*, vol. 29, no. 1, pp. 63–76, Jan 1999, DOI [10.1109/3468.736361](https://doi.org/10.1109/3468.736361).
- [78] T. Rogalsky, S. Kocabiyik, and R. Derksen, "Differential Evolution in Aerodynamic Optimization," *Canadian Aeronautics and Space Journal*, vol. 46, no. 4, pp. 183–190, 2000.
- [79] K. V. Price, R. M. Storn, and J. A. Lampinen, *Differential Evolution : A Practical Approach to Global Optimization*. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2005.
- [80] S. Das, A. Abraham, and A. Konar, "Automatic Clustering Using an Improved Differential Evolution Algorithm," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A : Systems and Humans*, vol. 38, no. 1, pp. 218–237, Jan 2008, DOI [10.1109/TSMCA.2007.909595](https://doi.org/10.1109/TSMCA.2007.909595).
- [81] S. Das and P. N. Suganthan, "Differential Evolution : A Survey of the State-Of-The-Art," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 15, no. 1, pp. 4–31, Feb 2011, DOI [10.1109/TEVC.2010.2059031](https://doi.org/10.1109/TEVC.2010.2059031).
- [82] F. Neri and V. Tirronen, "Recent Advances in Differential Evolution : A Survey and Experimental Analysis," *Artificial Intelligence Review*, vol. 33, no. 1, pp. 61–106, Feb 01, 2010, DOI [10.1007/s10462-009-9137-2](https://doi.org/10.1007/s10462-009-9137-2).
- [83] A. Qin and P. Suganthan, "Self-adaptive differential evolution algorithm for numerical optimization," in *2005 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, vol. 2, Sep. 2005, pp. 1785–1791 Vol. 2, DOI [10.1109/CEC.2005.1554904](https://doi.org/10.1109/CEC.2005.1554904).
- [84] A. K. Qin, V. L. Huang, and P. N. Suganthan, "Differential Evolution Algorithm with Strategy Adaptation for Global Numerical Optimization," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 13, no. 2, pp. 398–417, April 2009, DOI [10.1109/TEVC.2008.927706](https://doi.org/10.1109/TEVC.2008.927706).
- [85] E. Mezura-Montes, J. Velázquez-Reyes, and C. Coello, "A Comparative Study of Differential Evolution Variants for Global Optimization," in *GECCO 2006 - Genetic and Evolutionary Computation Conference*, vol. 1, 07 2006, pp. 485–492, DOI [10.1145/1143997.1144086](https://doi.org/10.1145/1143997.1144086).
- [86] J. Lampinen and I. Zelinka, "On Stagnation of the Differential Evolution Algorithm," in *Proceedings of Mendel 2000, 6th International Conference on Soft Computing*, P. Oimera, Ed. Czech Republic : Bmo University of Technology, Bmo, June 7–9 2000, pp. 76–83.



- [87] R. Gämperle, S. D. Müller, and P. Koumoutsakos, “A Parameter Study for Differential Evolution,” in *Advances in intelligent systems, fuzzy systems, evolutionary computation*, A. Grmela and N. E. Mastorakis, Eds. Switzerland, Interlaken : WSEAS Press, 2002, pp. 293–298.
- [88] D. Zaharie, “Control of Population Diversity and Adaptation in Differential Evolution Algorithms,” in *Proceedings of Mendel 2003, 9th International Conference on Soft Computing*, R. Matousek and P. Osmera, Eds. Czech Republic : Bmo University of Technology, Bmo, June 2003, pp. 41–46.
- [89] S. Das, A. Konar, and U. K. Chakraborty, “Two Improved Differential Evolution Schemes for Faster Global Search,” in *Proceedings of the 7th Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation*, ser. GECCO '05. New York, NY, USA : Association for Computing Machinery, 2005, p. 991998, DOI [10.1145/1068009.1068177](https://doi.org/10.1145/1068009.1068177).
- [90] R. Mallipeddi, P. Suganthan, Q. Pan, and M. Tasgetiren, “Differential Evolution Algorithm with Ensemble of Parameters and Mutation Strategies,” *Applied Soft Computing*, vol. 11, no. 2, pp. 1679–1696, 2011, the Impact of Soft Computing for the Progress of Artificial Intelligence. DOI <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2010.04.024>.
- [91] T. Eltaeib and A. Mahmood, “Differential Evolution : A Survey and Analysis,” *Applied Sciences*, vol. 8, no. 10, 2018, DOI [10.3390/app8101945](https://doi.org/10.3390/app8101945).
- [92] S. Das, S. S. Mullick, and P. Suganthan, “Recent Advances in Differential Evolution – An Updated Survey,” *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 27, pp. 1–30, 2016, DOI <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2016.01.004>.
- [93] M. Sepesy Mauec and J. Brest, “A Review of the Recent Use of Differential Evolution for Large-Scale Global Optimization : An Analysis of Selected Algorithms on the CEC 2013 LSGO Benchmark Suite,” *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 50, p. 100428, 2019, DOI <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2018.08.005>.
- [94] P. Sharma, H. Sharma, S. Kumar, and J. C. Bansal, “A Review on Scale Factor Strategies in Differential Evolution Algorithm,” in *Soft Computing for Problem Solving*, J. C. Bansal, K. N. Das, A. Nagar, K. Deep, and A. K. Ojha, Eds. Singapore : Springer Singapore, 2019, pp. 925–943.
- [95] K. R. Opara and J. Arabas, “Differential Evolution : A Survey of Theoretical Analyses,” *Swarm and Evolutionary Computation*, vol. 44, pp. 546–558, 2019, DOI <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2018.06.010>.
- [96] J. E. Baker, “Reducing Bias and Inefficiency in the Selection Algorithm,” in *Proceedings of the Second International Conference on Genetic Algorithms on Genetic Algorithms and Their Application*. USA : L. Erlbaum Associates Inc., 1987, p. 1421.
- [97] J. Brest, S. Greiner, B. Boskovic, M. Mernik, and V. Zumer, “Self-Adapting Control Parameters in Differential Evolution : A Comparative Study on Numerical Benchmark Problems,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 10, no. 6, pp. 646–657, Dec 2006, DOI [10.1109/TEVC.2006.872133](https://doi.org/10.1109/TEVC.2006.872133).

- [98] J. Zhang and A. C. Sanderson, "JADE : Self-Adaptive Differential Evolution with Fast and Reliable Convergence Performance," in *2007 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Sep. 2007, pp. 2251–2258, DOI [10.1109/CEC.2007.4424751](https://doi.org/10.1109/CEC.2007.4424751).
- [99] —, "JADE : Adaptive Differential Evolution with Optional External Archive," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 13, no. 5, pp. 945–958, Oct 2009, DOI [10.1109/TEVC.2009.2014613](https://doi.org/10.1109/TEVC.2009.2014613).
- [100] R. Tanabe and A. Fukunaga, "Success-History Based Parameter Adaptation for Differential Evolution," in *2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation*, June 2013, pp. 71–78, DOI [10.1109/CEC.2013.6557555](https://doi.org/10.1109/CEC.2013.6557555).
- [101] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization," in *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, vol. 4, Nov 1995, pp. 1942–1948 vol.4, DOI [10.1109/ICNN.1995.488968](https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968).
- [102] E. O. Wilson, *Sociobiology : The New Synthesis*. Harvard University Press, 1975.
- [103] Y. Zhang, S. Wang, and G. Ji, "A Comprehensive Survey on Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2015, p. 931256, Oct 07, 2015, DOI [10.1155/2015/931256](https://doi.org/10.1155/2015/931256).
- [104] A. Ortiz-Conde, O. Trejo, and F. J. García-Sánchez, "Direct Extraction of Solar Cell Model Parameters Using Optimization Methods," in *2021 IEEE Latin America Electron Devices Conference (LAEDC)*, April 2021, pp. 1–6, DOI [10.1109/LAEDC51812.2021.9437951](https://doi.org/10.1109/LAEDC51812.2021.9437951).
- [105] Python, Online at <https://www.python.org/>.
- [106] C. R. Houck, J. A. Joines, and M. G. Kay, "A Genetic Algorithm for Function Optimization : A Matlab Implementation," North Carolina State University, Paris, Tech. Rep. Technical Report NCSU-IE Technical Report 95-09, 1996, Online at <https://www.ise.ncsu.edu/people/kay/>.
- [107] Matlab, Online at <https://www.mathworks.com/products/matlab.html>.
- [108] M. Wall, *GAlib : A C++ Library of Genetic Algorithm Components*. Mechanical Engineering Department, Massachusetts Institute of Technology, 1996, Online at <http://lancet.mit.edu/ga/>.
- [109] —, *GAlib : A C++ Library of Genetic Algorithm Components (Version 2.4.7)*. Massachusetts Institute of Technology, Online at <http://lancet.mit.edu/ga/>.
- [110] S. M. Parida and P. K. Rout, "Differential Evolution with Dynamic Control Factors for Parameter Estimation of Photovoltaic Models," *Journal of Computational Electronics*, Jan. 2021, DOI [10.1007/s10825-020-01617-z](https://doi.org/10.1007/s10825-020-01617-z).
- [111] A. Ferhat Hamida and I. Tebbal, "Detrmination of the Series Resistance and the Ideality Factor of Solar Cells by Genetic Algorithms in Noisy Environement," in *Proceedings of the 3rd International Conference on Advances in Mechanical Engineering Istanbul 2017 (ICAME 2017)*, Istanbul, Turkey, 19–21 Dec. 2017, pp. 313–316.

- [112] I. Tebbal and A. Ferhat Hamida, "Solar Cells and Pv Modules Parameters Extraction Using Lateral and Vertical Optimization Methods," in *Séminaire National sur l'Electronique - Conception des Systèmes Electroniques Programmables pour les Télécommunications (C7COM)*. Bordj Bou Arreridj, Algeria : Université de Bordj Bou Arreridj, 18 Jun. 2014.
- [113] K. Yu, B. Qu, C. Yue, S. Ge, X. Chen, and J. Liang, "A Performance-Guided Jaya Algorithm for Parameters Identification of Photovoltaic Cell and Module," *Applied Energy*, vol. 237, pp. 241–257, 2019, DOI <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.008>.
- [114] K. Yu, X. Chen, X. Wang, and Z. Wang, "Parameters Identification of Photovoltaic Models Using Self-Adaptive Teaching-Learning-Based Optimization," *Energy Conversion and Management*, vol. 145, pp. 233–246, 2017, DOI <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.04.054>.
- [115] X. Chen and K. Yu, "Hybridizing Cuckoo Search Algorithm with Biogeography-Based Optimization for Estimating Photovoltaic Model Parameters," *Solar Energy*, vol. 180, pp. 192–206, 2019, DOI <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.025>.
- [116] L. J. Eshelman and J. D. Schaffer, "Real-Coded Genetic Algorithms and Interval-Schemata," in *Foundations of Genetic Algorithms*, ser. Foundations of Genetic Algorithms, L. D. WHITLEY, Ed. Elsevier, 1993, vol. 2, pp. 187–202, DOI <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-094832-4.50018-0>.
- [117] T. M. Inc., "Global Optimization Toolbox," Natick, Massachusetts, United States, 2022, Online at <https://www.mathworks.com/help/gads/getting-started-with-globaloptimization-toolbox.html>.
- [118] scikit opt, Online at <https://github.com/guofei9987/scikit-opt>.
- [119] libga2, "libga2 (1 :2.4.7-4)," Dec. 2020, Online at <https://packages.debian.org/buster/libga2>.
- [120] X. Ma, W. Huang, E. Schnabel, M. Köhl, J. Brynjarsdóttir, J. L. Braid, and R. H. French, "Data-Driven IV Feature Extraction for Photovoltaic Modules," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 9, no. 5, pp. 1405–1412, Sep. 2019, number : 5. DOI [10.1109/JPHOTOV.2019.2928477](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2019.2928477).
- [121] A. Askarzadeh and A. Rezaadeh, "Parameter Identification for Solar Cell Models Using Harmony Search-Based Algorithms," *Solar Energy*, vol. 86, no. 11, pp. 3241–3249, 2012, number : 11. DOI <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.08.018>.
- [122] I. Tebbal and A. Ferhat Hamida, "Effects of Crossover Operators on Genetic Algorithms for the Extraction of Solar Cell Parameters from Noisy Data," *Engineering, Technology & Applied Science Research*, vol. 13, no. 3, pp. 10 630–10 637, 2023, DOI <https://doi.org/10.48084/etasr.5417>.
- [123] A. R. Jordehi, "Maximum Power Point Tracking in Photovoltaic (PV) Systems : A Review of Different Approaches," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 65, pp. 1127 – 1138, 2016, DOI <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.053>.
- [124] K. Ishaque, Z. Salam, H. Taheri, and A. Shamsudin, "A Critical Evaluation of EA Computational Methods for Photovoltaic Cell Parameter Extraction Based on Two Diode Model," *Solar Energy*, vol. 85, no. 9, pp. 1768–1779, 2011, DOI <https://doi.org/10.1016/j.solener.2011.04.015>.

- [125] N. Barth, R. Jovanovic, S. Ahzi, and M. A. Khaleel, "PV Panel Single and Double Diode Models : Optimization of the Parameters and Temperature Dependence," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 148, pp. 87–98, Apr. 2016, DOI [10.1016/j.solmat.2015.09.003](https://doi.org/10.1016/j.solmat.2015.09.003).
- [126] C. Zhang, Y. Zhang, J. Su, T. Gu, and M. Yang, "Performance Prediction of PV Modules Based on Artificial Neural Network and Explicit Analytical Model," *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 12, no. 1, p. 013501, 01 2020, DOI [10.1063/1.5131432](https://doi.org/10.1063/1.5131432).
- [127] H. Nunes, J. Pombo, S. Mariano, M. Calado, and J. Felipe de Souza, "A New High Performance Method for Determining the Parameters of PV Cells and Modules Based on Guaranteed Convergence Particle Swarm Optimization," *Applied Energy*, vol. 211, pp. 774–791, 2018, DOI <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.078>.
- [128] A. Laudani, F. Riganti Fulginei, and A. Salvini, "Identification of the One-Diode Model for Photovoltaic Modules from Datasheet Values," *Solar Energy*, vol. 108, pp. 432–446, 2014, DOI <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.07.024>.
- [129] W. De Soto, S. Klein, and W. Beckman, "Improvement and Validation of a Model for Photovoltaic Array Performance," *Solar Energy*, vol. 80, no. 1, pp. 78–88, 2006, DOI <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.06.010>.
- [130] P. Hao and Y. Zhang, "An Improved Method for Parameter Identification and Performance Estimation of PV Modules from Manufacturer Datasheet Based on Temperature-Dependent Single-Diode Model," *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 11, no. 6, pp. 1446–1457, 2021, DOI [10.1109/JPHOTOV.2021.3114592](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2021.3114592).
- [131] H. Tian, F. Mancilla-David, K. Ellis, E. Muljadi, and P. Jenkins, "A Cell-To-Module-To-Array Detailed Model for Photovoltaic Panels," *Solar Energy*, vol. 86, no. 9, pp. 2695–2706, 2012, DOI <https://doi.org/10.1016/j.solener.2012.06.004>.
- [132] D. Fébba, R. Rubinger, A. Oliveira, and E. Bortoni, "Impacts of Temperature and Irradiance on Polycrystalline Silicon Solar Cells Parameters," *Solar Energy*, vol. 174, pp. 628–639, 2018, DOI <https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.09.051>.
- [133] F. Ghani, G. Rosengarten, M. Duke, and J. Carson, "On the Influence of Temperature on Crystalline Silicon Solar Cell Characterisation Parameters," *Solar Energy*, vol. 112, pp. 437–445, 2015, DOI <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.12.018>.
- [134] M. Chegaar, A. Hamzaoui, A. Namoda, P. Petit, M. Aillerie, and A. Herguth, "Effect of Illumination Intensity on Solar Cells Parameters," *Energy Procedia*, vol. 36, pp. 722–729, 2013, terraGreen 13 International Conference 2013 - Advancements in Renewable Energy and Clean Environment. DOI <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.07.084>.
- [135] F. Khan, S.-H. Baek, and J. H. Kim, "Wide Range Temperature Dependence of Analytical Photovoltaic Cell Parameters for Silicon Solar Cells Under High Illumination Conditions," *Applied Energy*, vol. 183, pp. 715–724, 2016, DOI <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.09.020>.

- [136] P. Singh and N. Ravindra, "Temperature Dependence of Solar Cell Performance – An Analysis," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 101, pp. 36–45, 2012, DOI <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.02.019>.
- [137] L. H. I. Lim, Z. Ye, J. Ye, D. Yang, and H. Du, "A Linear Method to Extract Diode Model Parameters of Solar Panels from a Single IV Curve," *Renewable Energy*, vol. 76, pp. 135–142, 2015, DOI <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.018>.
- [138] F. Khan, S.-H. Baek, and J. H. Kim, "Intensity Dependency of Photovoltaic Cell Parameters Under High Illumination Conditions : An Analysis," *Applied Energy*, vol. 133, pp. 356–362, 2014, DOI <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.07.107>.
- [139] F. Khan, S. Singh, and M. Husain, "Effect of Illumination Intensity on Cell Parameters of a Silicon Solar Cell," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 94, no. 9, pp. 1473–1476, 2010, pVSEC 18. DOI <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2010.03.018>.
- [140] F. Khan, S.-H. Baek, Y. Park, and J. H. Kim, "Extraction of Diode Parameters of Silicon Solar Cells Under High Illumination Conditions," *Energy Conversion and Management*, vol. 76, pp. 421–429, 2013, DOI <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.07.054>.
- [141] J. Eikelboom and A. Reinders, "Determination of the Irradiation Dependent Efficiency of Multicrystalline Si PV Modules on Basis of IV Curve Fitting and Its Influence on the Annual Performance," in *14th European PV Solar Energy Conference*, July 1997, pp. 293–296, Online at <ftp://kerntechnik.nl/pub/www/library/report/1997/rx97045>.
- [142] E. Cuce, P. M. Cuce, and T. Bali, "An Experimental Analysis of Illumination Intensity and Temperature Dependency of Photovoltaic Cell Parameters," *Applied Energy*, vol. 111, pp. 374–382, 2013, DOI <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.05.025>.
- [143] M. Deshmukh and J. Nagaraju, "Measurement of Silicon and GaAs/Ge Solar Cell Device Parameters," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 89, no. 4, pp. 403–408, 2005, DOI <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2005.01.005>.
- [144] P. Singh, S. Singh, M. Lal, and M. Husain, "Temperature Dependence of IV Characteristics and Performance Parameters of Silicon Solar Cell," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 92, no. 12, pp. 1611–1616, 2008, DOI <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2008.07.010>.
- [145] J. D. Arora, A. V. Verma, and M. Bhatnagar, "Variation of Series Resistance with Temperature and Illumination Level in Diffused Junction Poly- and Single-Crystalline Silicon Solar Cells," *Journal of Materials Science Letters*, vol. 5, no. 12, pp. 1210–1212, Dec 01, 1986, DOI [10.1007/BF01729367](https://doi.org/10.1007/BF01729367).
- [146] Priyanka, M. Lal, and S. Singh, "A New Method of Determination of Series and Shunt Resistances of Silicon Solar Cells," *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 91, no. 2, pp. 137–142, 2007, DOI <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2006.07.008>.

- [147] J. Ding, X. Cheng, and T. Fu, “Analysis of Series Resistance and PT Characteristics of the Solar Cell,” *Vacuum*, vol. 77, no. 2, pp. 163–167, 2005, DOI <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2004.08.019>.
- [148] S. Banerjee and W. A. Anderson, “Temperature Dependence of Shunt Resistance in Photovoltaic Devices,” *Applied Physics Letters*, vol. 49, no. 1, pp. 38–40, 07 1986, DOI [10.1063/1.97076](https://doi.org/10.1063/1.97076).
- [149] C. S. Ruschel, F. P. Gasparin, E. R. Costa, and A. Krenzinger, “Assessment of PV Modules Shunt Resistance Dependence on Solar Irradiance,” *Solar Energy*, vol. 133, pp. 35–43, 2016, DOI <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.047>.
- [150] J. Xu, “Separable Nonlinear Least Squares Search of Parameter Values in Photovoltaic Models,” *IEEE Journal of Photovoltaics*, vol. 12, no. 1, pp. 372–380, Jan 2022, DOI [10.1109/JPHOTOV.2021.3126105](https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2021.3126105).
- [151] F. J. Toledo, J. M. Blanes, and V. Galiano, “Two-Step Linear Least-Squares Method for Photovoltaic Single-Diode Model Parameters Extraction,” *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 8, pp. 6301–6308, Aug 2018, DOI [10.1109/TIE.2018.2793216](https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2793216).
- [152] A. P. Dobos, “An Improved Coefficient Calculator for the California Energy Commission 6 Parameter Photovoltaic Module Model,” *Journal of Solar Energy Engineering*, vol. 134, no. 2, p. 021011, 03 2012, DOI [10.1115/1.4005759](https://doi.org/10.1115/1.4005759).
- [153] T. Ma, W. Gu, L. Shen, and M. Li, “An Improved and Comprehensive Mathematical Model for Solar Photovoltaic Modules Under Real Operating Conditions,” *Solar Energy*, vol. 184, pp. 292–304, 2019, DOI <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.03.089>.

---

**Résumé :** L'extraction des paramètres électriques des dispositifs photovoltaïques est une opération crucial quant à leurs modélisation, simulation et optimisation. Plusieurs modèles ont été établis pour prédire leur comportement et depuis les années 1960s un grand nombre de méthodes ont été proposé pour en extraire les paramètres. Depuis deux décennies, les méthodes métaheuristiques, et principalement les méthodes évolutionnaires (EAs), se sont imposées dans le domaine grâce à leurs avantages uniques dont la non nécessité de point initial, l'estimation simultanée de tous les paramètres et l'habilité d'échapper aux minimums locaux. Dans cette thèse, on démontre tout d'abord la supériorité des EAs puis on étudie l'effet de l'opérateur de croisement sur les algorithmes génétiques pour estimer les paramètres d'une cellule solaire dans un environnement bruité. L'étude, faite en fonction de la taille de la population, du nombre de génération et du niveau du bruit, montre que les GAs avec l'opérateur de fusion rivalise avec les EAs les plus efficaces. Les GAs sont ensuite appliquer à deux modules solaires pour étudier l'effet de la température et de l'illumination sur les paramètres estimés. L'étude montre que la variation en fonction de la température suit la théorie pour les illuminations fortes. Pour la variation en fonction de l'illumination, les comportements n'ont pas été prédits auparavant.

**Mots-Clés :** cellules solaires, modules solaires; extraction des paramètres, algorithmes métaheuristiques; algorithmes génétiques, opérateurs de croisement.

**Abstract:** The extraction of electrical parameters of photovoltaic devices is a crucial operation for their modeling, simulation and optimization. Several models have been established to predict their behavior and since the 1960s a large number of methods have been proposed to extract their parameters. In the last two decades, metaheuristic methods, and mainly evolutionary methods (EAs), have been intensively used thanks to their unique advantages including the non-requirement of an initial point, the simultaneous estimation of all parameters and the ability to escape local minimums. In this thesis, we first demonstrate the superiority of EAs then we study the effect of the crossover operator on genetic algorithms to estimate the parameters of a solar cell in a noisy environment. The study, carried out according to the size of the population, the number of generations and the noise level, shows that GAs with the blend operator compete with the most efficient EAs. The GAs are then applied to two solar modules to study the effect of temperature and illumination on the estimated parameters. The study shows that the variation as a function of temperature follows the theory for strong illuminations. For variation as a function of illumination, the behavior has not been previously predicted.

**Keywords:** solar cells, solar pannels; parameter extraction, metaheuristic algorithms; genetic algorithms, crossover operators

**المخلص:** يعد استخراج المعلمات الكهربائية من الأجهزة الكهروضوئية عملية حاسمة للنمذجة والمحاكاة وتحسين الأداء. تم تأسيس عدة نماذج للتنبؤ بسلوكها، ومنذ الستينيات تم اقتراح عدد كبير من الطرق لاستخراج معلماتها. على مدى عقدين من الزمن، أثبتت الأساليب الميتاهورستية، وخاصة الأساليب التطورية (EAs)، نفسها في هذا المجال بفضل مزاياها الفريدة بما في ذلك عدم اشتراط نقطة ابتدائية، والتقدير المتزامن لجميع المعلمات والقدرة على الهروب من الحد الأدنى المحلي. في هذه الأطروحة قمنا أولاً بإظهار تفوق الأساليب التطورية ثم قمنا بدراسة تأثير عامل التزاوج على الخوارزميات الجينية لتقدير معلمات الخلية الشمسية في بيئة ضوضائية. تظهر الدراسة التي تم إجراؤها وفقاً لحجم الأجيال وعددها ومستوى الضوضاء، أن الخوارزميات الجينية التي تستعمل عامل التزاوج المزدوج تتنافس الأساليب التطورية الأكثر كفاءة. تم بعد ذلك تطبيق الخوارزميات الجينية على لوحين شمسيين لدراسة تأثير درجة الحرارة والإضاءة على المعلمات المقدرة. تشير الدراسة أن تغير المعلمات حسب درجة الحرارة في حالة الإضاءة القوية يتبع الدراسات نظرية. بالنسبة لتغير المعلمات حسب الإضاءة فإنه لم يتم التنبؤ بالسلوكيات المحصل عليها سابقاً.

**المفاتيح:** الخلايا الشمسية؛ الألواح الشمسية؛ استخراج المعلمات؛ خوارزميات ميتاهورستية؛ الخوارزميات الجينية؛ عامل مزدوج

---