



## UNIVERSITE DE BATNA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur  
Département d'Electrotechnique

### **THESE DE DOCTARAT EN SCIENCES**

Par

*Mohamed Djarallah*

(Ingénieur d'état en Electrotechnique de l'Université D'Alexandrie, Egypte, 1981)  
(Magister en Electrotechnique de l'Université de Batna, Algérie, 2000)

### ***Thème***

### **CONTRIBUTION A L'ETUDE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES RESIDENTIELS COUPLES AU RESEAU ELECTRIQUE**

Mémoire soutenu le 16 / 01 / 2008  
Devant le jury composé de :

Jury	Grade	Affiliation	QUALITE
<b>Abdessamed Rachid</b>	Prof.	Université de Batna	Président
<b>Azoui Boubaker</b>	M.C.	Université de Batna	Rapporteur
<b>Chabane Mabrouk</b>	M.C.	Université de Batna	Co- Rapporteur
<b>Aida M<sup>ed</sup> salah</b>	Prof.	Université de Constantine	Examineur
<b>Hamidat Abderhmane</b>	M. R.	CDER (Alger)	Examineur
<b>Hadj Arab Ammar</b>	Dr. R.	CDER (Alger)	Examineur

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

.....  
.....  
.....

..

(

):

..

.....

.

.....

..

..

.

..

.

..

.....



## Remerciements

Le travail présenté dans cette thèse a été effectué au Laboratoire LEB d'électrotechnique, Faculté de l'ingénieur, Université de Batna, Algérie.

Mes premiers remerciements vont à *B. Azoui*, Professeur et membre du staff du Laboratoire LEB d'électrotechnique, Faculté de l'ingénieur, Université de Batna. Je le remercie vivement pour sa présence tout au long de ces travaux. Sa compétence scientifique, sa disponibilité, sa sympathie et sa bonne humeur en font de lui un frère, collègue, encadrant exceptionnel. Travailler à son côté est un plaisir. Ainsi que de remercier *M. Chabane*, Professeur à la Faculté de l'ingénieur, Université de Batna en tant qu'un frère et co-encadrant.

Je remercie vivement Monsieur *R. Abdessamed*, Professeur à l'université et directeur du Laboratoire LEB d'Electrotechnique, pour son aide précieuse et d'avoir accepté d'administrer ce jury.

Je tiens à remercier tout particulièrement Prof. *Aida M<sup>ed</sup> salah*, Dr. *Hamidat Abderhmane* et *Hadj Arab Ammar* qui nous ont fait l'honneur de participer au jury de cette thèse.

Que *Dr. K. Chikhi*, Chef du Dept. ELT et *Dr. F. Cherif*, S/D chargé de la pédagogie du Dept. ELT soient remercié pour leurs aides matériels et morales.

Je remercie également M<sup>er</sup> *D. Benlaala* d'avoir participer à la correction de la manuscrite de cette thèse.

Je suis très reconnaissant envers ma 'petite' famille (Mon épouse et mes 9 enfants) pour leurs sympathies et leurs présences à mes cotés durant toute cette période.

Je tiens également à présenter ma plus vive sympathie aux frères : *H. Nasri*, *H. Boucetta* et tous les membres du département ELT.

مساهمة في دراسة أنظمة الطاقة الشمسية الفوتوفولطية  
الموصولة بالشبكة الكهربائية العامة  
(ملخص)

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

1037W/m<sup>2</sup>

(Photovoltaïque)

( ( BP4160S MSX-60 ) )

BIBLIOTHEQUE DU CERIST

( Optimisation )

( )

(δ m)

/

*Table des matières*

# Table des matières

---

Résumé en Langue Arabe.....	I
Sommaire.....	III
Notations et Symboles.....	VII
Introduction Générale.....	1
Contexte .....	1
Problématique.....	1
Structure du mémoire.....	2
Bibliographie.....	3

---

## Chapitre 1

### Issues des Systèmes Photovoltaïques Couplés aux Réseaux Publics : Etat d'Art

---

<b>1.1-Introduction.....</b>	<b>4</b>
<b>1.2-Balance énergétique mondiale.....</b>	<b>4</b>
1.2.1-Consommation d'énergie.....	4
1.2.2-Réserves d'énergie épuisable.....	5
1.2.3-Réserves et croissances d'énergie non épuisable (renouvelables).....	7
<b>1.3-Potentiel solaire.....</b>	<b>8</b>
1.3.1-Potentiel solaire extraterrestre.....	8
1.3.1.1-Rayonnement solaire extraterrestre.....	8
1.3.1.2-Temps solaire vrai (TSV).....	9
1.3.1.3-Position du soleil.....	10
1.3.1.4-Géométrie d'orientation : collecteur- faisceau du soleil.....	10
1.3.2- Potentiel solaire terrestre.....	11
1.3.2.1-Rayonnement solaire au sol.....	11
1.3.2.2-Rayonnement disponible.....	13
1.3.2.3-Adaptation de rayonnement.....	14
<b>1.4-Systèmes photovoltaïques interconnectés au réseau : état d'art des concepts.....</b>	<b>16</b>
1.4.1-Cellules, panneaux et champ photovoltaïques.....	17
1.4.2-Système de conditionnement.....	20
1.4.2.1-Onduleurs.....	20
1.4.2.2-Interfaces entre les différents sous systèmes.....	23
1.4.3-Charges-Réseau électrique.....	24
<b>1.5-Aspects technico-économiques.....</b>	<b>25</b>
1.5.1-Aspects techniques.....	25
1.5.1.1-Performance énergétique : <i>Productivité et coefficient de performance</i> .....	25
1.5.1.2-Planning.....	26
1.5.2-Aspects économiques.....	27
1.5.2.1-Coût d'investissement.....	28
1.5.2.2-Coût énergétique.....	28
<b>1.6-Valeurs ajoutées et obstacles.....</b>	<b>29</b>
1.6.1-Quelques Valeurs supplémentaires (ajoutées).....	29
1.6.2-Quelques obstacles à la croissance de la PV ( Problématiques).....	30
<b>1.7-Conclusion.....</b>	<b>31</b>
<b>1.8-Bibliographie.....</b>	<b>31</b>



## Chapitre 2

### Analyse et Validation de Divers Modèles d'une Source Photovoltaïque

<b>2.1-Introduction</b> .....	37
<b>2.2-Description et modélisation des éléments d'une chaîne PVCR</b> .....	37
2.2.1-Etat d'art.....	37
2.2.2-Elaboration des modèles.....	38
2.2.2.1-Modèles (cellule solaire) :1 <sup>er</sup> , 2 <sup>eme</sup> , 3 <sup>eme</sup> et 4 <sup>eme</sup> .....	38
2.2.2.2-Modèle du module PV.....	43
2.2.2.3-Modèle du champ (Array) PV.....	44
2.2.2.4-Evaluation préliminaire des trois modèles.....	45
<b>2.3-Investigation dans les parties actives du GPV</b> .....	47
2.3.1-Caractéristiques et impact des effets de A et de R <sub>s</sub> .....	47
2.3.2-Validation des modèles.....	51
2.3.3-Techniques de sélection des modèles du champ PV.....	57
<b>2.5-Conclusion</b> .....	58
<b>2.6-Bibliographie</b> .....	58

## Chapitre 3

### Analyse Conceptuelle et Technique des Systèmes de Conditionnement de Puissances : Systèmes PV Résidentiels Couplés aux Réseaux Electriques

<b>3.1-Introduction</b> .....	61
<b>3.2-Différentes classes de modèles</b> .....	62
3.2.1-Classe 1 : Gestion et modalité de raccordement.....	62
3.2.1.1-Injection du surplus de la production.....	62
3.2.1.2-Injection de la totalité de la production.....	63
3.2.2-Classe 2 : Qualité d'énergie.....	64
3.2.2.1- Suppression des effets indésirables.....	64
3.2.2.2-Compensation et correction.....	65
3.2.3-Classe 3 : Modes d'extraction d'énergie PV maximale.....	65
3.2.4-Conclusion partielle.....	66
<b>3.3-Modèles mathématiques des éléments de l'interface</b> .....	66
3.3.1-Modélisation de l'onduleur.....	66
3.3.1.1-Modèle de la tension d'entrée/sortie (E/S).....	67
3.3.1.2-Modélisation de l'MPPT.....	69
3.3.1.3-Modèle du rendement.....	73
3.3.2-Modélisation des systèmes de filtrage.....	75
3.3.3-Modélisation du réseau.....	77
3.3.4-Modélisation de la maille alternative (AC).....	78
3.3.4.1-Modèle en circuits électriques.....	78
3.3.4.2-Mise en équations.....	79
<b>3.4-Investigation des effets de V<sub>s</sub> et δ</b> .....	81
3.4.1-Critères d'inter-échange d'énergie.....	81
3.4.2-Comportement du système dans le plan courant continu (CC).....	84
3.4.2.1-Facteurs de transformation et courbes de charge (LC).....	84

3.4.2.2-Identification des intervalles et suggestions.....	85
<b>3.5-Conclusion.....</b>	<b>87</b>
<b>3.6-Bibliographie.....</b>	<b>88</b>

## Chapitre 4

### Optimisation des Systèmes Photovoltaïques Résidentiels Couplés aux Réseaux Electriques : Un Outil de Conception

<b>4.1-Introduction.....</b>	<b>94</b>
<b>4.2-Structure fonctionnelle d'optimisation d'un système PV en réseau.....</b>	<b>94</b>
<b>4.3-Optimisations fonctionnelles du générateur PV (GPV).....</b>	<b>96</b>
4.3.1-Optimisation des angles du collecteur PV.....	96
4.3.1.1-Ajustement d'angles et l'apport énergétique.....	96
4.3.1.2-Optimisation par modèle d'angle d'inclinaison : application.....	99
4.3.2-Optimisation fonctionnelle du champ PV.....	100
4.3.2.1-Modèle mathématique de l'MPPT direct.....	101
4.3.2.2-Effets de températures et éclairagements sur les paramètres de l'MPPT.....	102
4.3.2.3-Estimation des paramètres du champ PV.....	103
4.3.3-Optimisation par modèle du système de conditionnement de puissance.....	104
4.3.3.1-Indices d'évaluation de performances.....	104
4.3.3.2- Evaluation de l'indice de performance instantanée vs sa forme intégrale.....	105
4.3.3.3-Modèles complémentaires.....	106
4.3.3.4-Formulation du problème.....	109
<b>4.4-Problèmes d'optimisation et leurs méthodes de solution.....</b>	<b>110</b>
4.4.1-Classification de problèmes.....	110
4.4.2-Méthodes de la solution.....	111
<b>4.5-Simulation et discussions.....</b>	<b>113</b>
4.5.1-Angles d'inclinaison optimaux.....	113
4.5.2-Paramètres optimaux du conditionneur de puissance.....	117
4.5.2.1-Analyse de l'équation d'énergie journalière maximale du GPV.....	117
4.5.2.2-Analyse de l'optimisation du système de conditionnement.....	120
<b>4.6-Conclusion.....</b>	<b>123</b>
<b>4.7-Bibliographie.....</b>	<b>125</b>
<b>4.8 Annexes.....</b>	<b>125</b>

## Chapitre 5

### Développement d'une Méthodologie d'Aide à la Compréhension et à la Conception des Systèmes Photovoltaïques Couplés aux Réseaux Electriques

<b>5.1-Introduction.....</b>	<b>130</b>
<b>5.2-Bilan de puissances.....</b>	<b>130</b>
5.2.1-Maille alternative.....	130
5.2.2-Contre-réaction en maille continue.....	130
<b>5.3-Techniques de transformation.....</b>	<b>132</b>
<b>5.4-Transformation d'expressions entre plans.....</b>	<b>133</b>
5.4.1- Transformation CC→CA.....	133

5.4.2- Transformation CA→CC.....	134
<b>5.5-Développement des expressions découplées (prolongées)</b> .....	134
5.5.1-Développement analytique.....	135
5.5.2-Transformation des expressions prolongées.....	136
<b>5.6- Vérification des modèles prolongés</b> .....	137
5.6.1-Critères de vérification.....	137
5.6.2-Vérification analytique.....	138
5.6.2.1-Expression CC transférée.....	138
5.6.2.2-Expressions prolongées CA et CC .....	138
5.6.3-Vérification expérimentale.....	139
<b>5.7-Simulation et discussion d'un cas énergétique optimal</b> .....	140
5.7.1-Investigation du modèle prolongé dans le plan CA.....	140
5.7.1.1-Etalage de la technique de transformation par différentes LC's.....	140
5.7.1.2-Impact des paramètres sur la performance du système PV en réseau.....	142
5.7.2-Investigation du modèle prolongé dans le plan CC.....	146
5.7.2.1-Rôle de l'index de modulation m.....	146
5.7.2.2-Sélection de $V_{gmax}$ .....	148
5.7.3-Discussion par simulation d'un cas énergétique optimal.....	149
5.7.3.1-Contraintes et remèdes.....	149
5.7.3.2-Validation et impact.....	150
5.7.4-Recommandations conceptuelles.....	155
<b>5.8-Conclusion</b> .....	157
<b>5.9-Bibliographie</b> .....	158
<b>5.10 Annexe</b> .....	159
 <b>Conclusion et Perspectives</b>	
RESUME DE NOTRE CONTRIBUTION.....	158
NOS APPORTS.....	158
PERSPECTIVES.....	161
 <b>Annexe (Publications)</b> .....	 162