
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

جامعة سعد دحلب البليدة
Université SAAD DAHLAB de BLIDA

كلية التكنولوجيا
Faculté de Technologie

قسم الإلكترونيك
Département d'Électronique



Mémoire de Projet de Fin d'Études

présenté par

BENCHIROUF MUSTAPHA

&

KÉBLI MAD EDDINE ABDELILAH

Pour l'obtention du diplôme de Master en génie électrique Option : Traitement de l'Information et Systèmes Electroniques

Thème

Etude et implémentation d'un modèle mathématique d'un panneau solaire sur FPGA

Proposé et dirigé par :

Mr Tadrisk Rezki

Mr Mamoune Montassar

Année Universitaire 2011-2012

Dédicace

Ce travail est à la mémoire de mon père ;

Je le Didier à ma mare ;

Mes tantes ;

Mes frères mes cousin et tous mes amis.

C'est en cherchant quand trouve.

Imad Eddine Abdelilah

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes parents, pour leur patience, leurs encouragements et leur soutien inconditionnel.

Ainsi, à toute ma famille à mes chers frères et sœurs à mes nièces ;

Et mes collègues de travail de Téléport Bouchaoui de Télédiffusion d'Algérie (TDA) pour leurs encouragements.

Et à mon promoteur, mes amis et camarades de la classe Master TISE de la promotion 2012 ;

A tous mes professeurs d'Electronique de l'Université de Blida qui ont contribué à ma formation;

A mon binôme Imad Eddine que je remercie pour avoir partagé avec moi ces moments pour la réalisation de ce modeste travail et j'espère en garder de très bons souvenirs.

Mustapha.

Remerciements

Grâce à dieu le tout puissant nous avons pu accomplir ce modeste travail.

Nous adressons nos sincères remerciements à tous ceux qui ont contribué à sa réalisation, nous citons en particulier nos promoteurs Mr Tadrist Rezki et Mr Mamoune Montassar, qui nous ont orientés tout au long de ce travail, par ses conseils, et ses informations qui nous ont beaucoup aidées.

Nous remercions aussi les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous ont fait en évaluant notre modeste travail.

Nous tenons à remercier particulièrement les enseignants de département D'ELECTRONIQUE pour tout ce qui nous ont transmis, leurs efforts et leur disponibilité.

Nous tenons à remercier tous nos amis et camarades pour leurs soutien .

ملخص:

الهدف من عملنا هو دراسة ومحاكات نموذج للوحة كهروضوئية من نوع KC200GT, ونقوم بنمذجة هذا النوع باستعمال الطريقة الرياضية NCSM لحصول على أفضل نتائج (طاقة معتبرة) وذلك باستعمال برنامج MATLAB واستنتاج نتائج الخصائص الكهربائية (جهد - تيار) I-V, (طاقة - جهد) P-V, وفي الأخير قمنا بتنفيذ وشحن نموذج الرياضي NCSM في بطاقة FPGA.

كلمات المفاتيح: الكهروضوئية, FPGA, KC200GT,

Résumé :

L'objectif de ce travail est d'étudier et modélisé un panneau photovoltaïque KC200GT par la méthode NCSM (Natural Cubic Spline Method) pour obtenir de meilleurs résultats (la puissance maximale de panneau P-V) et nous avons faire la simulation sous MATLAB pour évaluer ses performances électriques (les caractéristiques courant – tension I-V et les caractéristiques puissance- tension P-V) et aussi nous avons implémenté ce modèle NCSM sur FPGA.

Mots clés : KC200GT ; photovoltaïque ; FPGA.

Abstract :

The objective of this work is to study and modeled by a photovoltaic panel KC200GT method HMCS (Natural Cubic Spline Method) for best results (the maximum power of the PV panel) and we do the simulation in MATLAB to evaluate its electrical performance (the current - voltage characteristics IV and PV power-voltage characteristics) and also we have implemented this model on NCSM (FPGA).

Keywords : KC200GT ; Photovoltaic ; FPGA.

Listes des acronymes et abréviations

FPGA	Field Programmable Gate Array
ISE	Integrated Software Engineering
MNCS	Méthode du Naturel Cubique Spline
MPPT	Maximum Power Point Tracking
NCSM	Natural Cubic Spline Method
NOCT	Nominal Operating Cell Temperature
PV	photovoltaïque
ROM	Read-Only Memory
STC	Standard Test Conditions
VHDL	Very High Speed Integrated Circuit, Hardware Description language

Table des matières

Introduction générale..... Erreur ! Signet non défini.

Chapitre 1 : système photovoltaïque..... Erreur ! Signet non défini.

- 1.1 Introduction..... Erreur ! Signet non défini.
- 1.2 L'effet photovoltaïque..... Erreur ! Signet non défini.
- 1.3 La photopile..... Erreur ! Signet non défini.
 - 1.3.1 Rendement de la cellule photovoltaïque..... Erreur ! Signet non défini.
 - 1.3.2 Circuit équivalent et modèle mathématique..... Erreur ! Signet non défini.
 - 1.3.3 Influence de l'ensoleillement et de la température..... Erreur ! Signet non défini.
- 1.4 Le module photovoltaïque..... Erreur ! Signet non défini.
- 1.5 Le champ photovoltaïque..... Erreur ! Signet non défini.
- 1.6 Conclusion..... Erreur ! Signet non défini.

Chapitre 2 : Description d'un modèle mathématique d'un panneau solaire Erreur ! Signet non défini.

- 2.1 Introduction..... Erreur ! Signet non défini.
- 2.2 La méthode naturelle cubique spline (MNCS)..... Erreur ! Signet non défini.
 - 2.2.1 Propriété de la cubique spline..... Erreur ! Signet non défini.
 - 2.2.2 L'algorithme de la cubique spline..... Erreur ! Signet non défini.
- 2.3 Modélisation du module KC200GT par la MNCS..... Erreur ! Signet non défini.
 - 2.3.1 Le modèle mathématique Lambert..... Erreur ! Signet non défini.
 - 2.3.2 Caractéristique du module KC200GT..... Erreur ! Signet non défini.
 - 2.3.3 La modélisation par la MNCS..... Erreur ! Signet non défini.
- 2.4 Conclusion..... Erreur ! Signet non défini.

Chapitre 3 : Simulation et interprétation des résultats..... Erreur ! Signet non défini.

- 3.1 Introduction..... Erreur ! Signet non défini.
- 3.2 Modélisation du panneau PV KC200GT par le modèle Lambert... Erreur ! Signet non défini.
 - 3.2.1 Influence de l'éclairement..... Erreur ! Signet non défini.
 - 3.2.2 Influence de la température..... Erreur ! Signet non défini.
 - 3.2.3 Comparaison entre le modèle Lambert et les caractéristiques données par le constructeur..... Erreur ! Signet non défini.
- 3.3 Modélisation du panneau PV KC200GT par la méthode MNCS.... Erreur ! Signet non défini.
- 3.4 Conclusion..... Erreur ! Signet non défini.

Chapitre 4 : Implémentation un modèle mathématique MSCN sur FPGA Erreur ! Signet non défini.

- 4.1 Introduction..... Erreur ! Signet non défini.
- 4.2 Étapes de conception..... Erreur ! Signet non défini.

4.3	Description de l'architecture globale.....	Erreur ! Signet non défini.
4.3.1	Bloc concaténation.....	Erreur ! Signet non défini.
4.3.2	Bloc générateur des donnés.....	Erreur ! Signet non défini.
4.4	Conclusion.....	Erreur ! Signet non défini.
	<i>Conclusion générale.....</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
	<i>Annexe.....</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>
	<i>Bibliographié.....</i>	<i>Erreur ! Signet non défini.</i>

Liste des figures

Chapitre I

- Figure 1. 1.* Répartition spectrale du rayonnement solaire..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 1. 2.* Description d'une cellule photovoltaïque..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 1. 3.* Circuit équivalent d'une cellule solaire..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 1. 4.* Caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'une cellule solaire pour un ensoleillement et une température donnés..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 1. 5.* Cellules connectées en série avec leur caractéristique courant-tension. **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 1. 6.* Cellules connectées en parallèle avec leur caractéristique courant-tension.. **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 1. 7.* Composantes d'un champ de modules PV. **Erreur ! Signet non défini.**

Chapitre II

- Figure 2. 1.* Courbe d'interpolation spline cubique d'une fonction..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 2. 2.* courbe de la fonction Lambert W **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 2. 3.* Caractéristique courant-tension du module photovoltaïque à KC200GT à différentes températures..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 2. 4.* Caractéristique courant-tension du module photovoltaïque à KC200GT à différents irradiation..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 2. 5.* Distribution des données du tableau 2.6..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 2. 6.* Distribution des données du tableau 2.7..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 2. 7.* Distribution des données du tableau 2.12..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 2. 8.* Distribution des données du tableau 2.13..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 2. 9.* Distribution des données du tableau 2.18..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 2. 10.* Distribution des données du tableau 2.19..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 2. 11.* Distribution des données du tableau 2.24..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 2. 12.* Distribution des données du tableau 2.25. **Erreur ! Signet non défini.**

Chapitre III

- Figure 3. 1.* Caractéristiques $I - V$ du panneau PV KC200GT pour $T = 25\text{ C}^\circ$, et $G = 200, 400, 600, 800$ et 1000 W/m^2 pour le modèle Lambert..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 3. 2.* Caractéristiques $I - V$ du panneau PV KC200GT pour $T = 25\text{ C}^\circ$, et $G = 200, 400, 600, 800$ et 1000 W/m^2 pour le modèle Lambert..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 3. 3.* La caractéristique $P - V$ du panneau PV KC200GT pour $G = 1000\text{ W/m}^2$, et $T = 25, 50$ et 75 C° pour le modèle Lambert..... **Erreur ! Signet non défini.**
- Figure 3. 4.* La caractéristique $P - V$ du panneau PV KC200GT pour $G = 1000\text{ W/m}^2$, et $T = 25, 50$ et 75 C° pour le modèle Lambert..... **Erreur ! Signet non défini.**

<i>Figure 3. 5.</i> La caractéristiques I – V du panneau PV KC200GT pour $T = 25C^0$ et $G = 200, 400, 600, 800, 1000 w/m^2$ pour le modèle Lambert.....	Erreur ! Signet non défini.
<i>Figure 3. 6.</i> La caractéristiques I – V du panneau PV KC200GT pour $T = 25C^0$ et $G = 200, 400, 600, 800, 1000 w/m^2$ donnés par le constructeur.....	Erreur ! Signet non défini.
<i>Figure 3. 7.</i> La caractéristique I – V du panneau PV KC200GT pour $T = 25, 50$ et $75 C^0$ et $G = 1000 W/m^2$	Erreur ! Signet non défini.
<i>Figure 3. 8.</i> La caractéristique I – V du panneau PV KC200GT pour $T = 25, 50$ et $75 C^0$ et $G = 1000 W/m^2$.	Erreur ! Signet non défini.
<i>Figure 3. 9.</i> La caractéristiques I – V et P – V du panneau PV KC200GT pour $T = 25C^0$ et $G = 1000 W/m^2$ pour la MNCS.....	Erreur ! Signet non défini.
<i>Figure 3. 10.</i> La caractéristique I – V et P – V du panneau PV KC200GT pour $T = 25C^0$ et $G = 800 W/m^2$ pour la MNCS.....	Erreur ! Signet non défini.
<i>Figure 3. 11.</i> La caractéristiques I – V et P – V du panneau PV KC200GT pour $T = 35C^0$ et $G = 1000 W/m^2$ pour la MNCS.....	Erreur ! Signet non défini.
<i>Figure 3. 12.</i> La caractéristique I – V et P – V du panneau PV KC200GT pour $T = 35C^0$ et $G = 800 W/m^2$ pour la MNCS.....	Erreur ! Signet non défini.
<i>Figure 3. 13.</i> La caractéristique I – V du panneau PV KC200GT pour $T = 25C^0$ et $G = 1000 W/m^2$ pour les deux modèles.....	Erreur ! Signet non défini.
<i>Figure 3. 14.</i> La caractéristique P – V du panneau PV KC200GT pour $T = 25C^0$ et $G = 1000 W/m^2$ pour les deux modèles.....	Erreur ! Signet non défini.
<i>Figure 3. 15.</i> La caractéristique I – V du panneau PV KC200GT pour $T = 25C^0$ et $G = 800 W/m^2$ pour les deux modèles.....	Erreur ! Signet non défini.
<i>Figure 3. 16.</i> La caractéristique P – V du panneau PV KC200GT pour $T = 25C^0$ et $G = 800 W/m^2$ pour les deux modèles.....	Erreur ! Signet non défini.
<i>Figure 3. 17.</i> La caractéristique I – V du panneau PV KC200GT pour $T = 35C^0$ et $G = 1000 W/m^2$ pour les deux modèles.....	Erreur ! Signet non défini.
<i>Figure 3. 18.</i> La caractéristique P – V du panneau PV KC200GT pour $T = 35C^0$ et $G = 1000 W/m^2$ pour les deux modèles.....	Erreur ! Signet non défini.
<i>Figure 3. 19.</i> La caractéristique I – V du panneau PV KC200GT pour $T = 35C^0$ et $G = 800 W/m^2$ pour les deux modèles.....	Erreur ! Signet non défini.
<i>Figure 3. 20.</i> La caractéristique P – V du panneau PV KC200GT pour $T = 35C^0$ et $G = 800 W/m^2$ pour les deux modèles.....	Erreur ! Signet non défini.

Chapitre IV

<i>Figure 4. 1.</i> Schéma des étapes de conception.....	Erreur ! Signet non défini.
<i>Figure 4. 2.</i> Architecture globale.....	Erreur ! Signet non défini.
<i>Figure 4. 3.</i> Architecture du Bloc concaténation.....	Erreur ! Signet non défini.
<i>Figure 4. 4.</i> Architecture du Bloc générateur des données.....	Erreur ! Signet non défini.
<i>Figure 4. 5.</i> Architecture des Blocs casi.....	Erreur ! Signet non défini.

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau 1. 1. Valeurs énergétiques des photons issues du spectre solaire.... **Erreur ! Signet non défini.**

Chapitre II

Tableau 2. 1. Caractéristique de panneau solaire KC200GT..... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2. 2. Données de I – V aux conditions de références..... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2. 3. Données de P – V aux conditions de références..... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2. 4. Les coefficients du polynôme d'interpolation aux conditions de références. **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2. 5. Les coefficients du polynôme d'interpolation aux conditions de références. **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2. 6. Les données de la caractéristique I – V pour les conditions de référence. **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2. 7. Les données de la caractéristique P – V pour les conditions de référence. **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2. 8. Données de I – V pour une température $T_c = 25\text{ C}^0$ et une insolation $G = 800\text{ w/m}^2$ **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2. 9. Données de P – V pour une température $T_c = 25\text{ C}^0$ et une insolation $G = 800\text{ w/m}^2$ **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2. 10. Les coefficients du polynôme d'interpolation ($T_c = 25\text{ C}^0$ et $G = 800\text{ w/m}^2$). **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2. 11. Les coefficients du polynôme d'interpolation ($T_c = 25\text{ C}^0$ et $G = 800\text{ w/m}^2$). **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2. 12. Les données de la caractéristique I – V ($T_c = 25\text{ C}^0$ et $G = 800\text{ w/m}^2$). **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2. 13. Les données de la caractéristique P – V ($T_c = 25\text{ C}^0$ et $G = 800\text{ w/m}^2$). **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2. 14. Données de I – V pour une température $T_c = 35\text{ C}^0$ et une insolation $G = 1000\text{ w/m}^2$ **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2. 15. Données de P – V pour une température $T_c = 35\text{ C}^0$ et une insolation $G = 1000\text{ w/m}^2$ **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2. 16. Les coefficients du polynôme d'interpolation ($T_c = 35\text{ C}^0$ et $G = 1000\text{ w/m}^2$).
..... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2. 17. Les coefficients du polynôme d'interpolation ($T_c = 35\text{ C}^0$ et $G = 1000\text{ w/m}^2$).
..... **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2. 18. Les données de la caractéristique I – V ($T_c = 35\text{ C}^0$ et $G = 1000\text{ w/m}^2$). **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2. 19. Les données de la caractéristique P – V ($T_c = 35\text{ C}^0$ et $G = 1000\text{ w/m}^2$). **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2. 20. Données de I-V pour une température $T_c = 35\text{ C}^0$ et une insolation $G = 800\text{ w/m}^2$ **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2. 21. Données de P-V pour une température $T_c = 35\text{ C}^0$ et une insolation $G = 800\text{ w/m}^2$ **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2. 22. Les coefficients du polynôme d'interpolation ($T_c = 35\text{ C}^0$ et $G = 800\text{ w/m}^2$). **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2. 23. Les coefficients du polynôme d'interpolation ($T_c = 35\text{ C}^0$ et $G = 800\text{ w/m}^2$). **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2. 24. Les données de la caractéristique I – V ($T_c = 35\text{ C}^0$ et $G = 800\text{ w/m}^2$). **Erreur ! Signet non défini.**

Tableau 2. 25. Les données de la caractéristique P – V ($T_c = 35\text{ C}^0$ et $G = 800\text{ w/m}^2$)....

Erreur ! Signet non défini.

Introduction générale

L'énergie est au centre de l'économie [1, 2] pour tous les pays et à la base de toute activité humaine. Ses sources se sont diversifiées au cours du temps afin de satisfaire une demande toujours croissante. Les pays développés sont ainsi passés du bois au charbon, à des hydrocarbures plus avancés, à l'hydroélectricité puis, enfin, au nucléaire. Cependant, les réserves de combustibles fossiles et nucléaires sont limitées. En plus, l'utilisation des combustibles fossiles est responsable des pluies acides et du réchauffement de la planète, et l'exploitation de l'énergie nucléaire présente des risques d'accidents graves sans parler de ceux induits par la gestion des déchets résultants dont la dangerosité radioactive peut durer plusieurs milliers d'années.

Il est évident que la dynamique énergétique du 21^{ème} siècle rassemblera de nouveaux acteurs issus du secteur des énergies renouvelables assurant ainsi un développement durable. L'énergie éolienne, solaire, thermique et géothermique, marémotrice, hydroélectrique de petite envergure, la biomasse et la cogénération sont autant de formes d'exploitation du potentiel des énergies renouvelables éparpillées sur différents sites.

Parmi ces différents moyens de générer de l'électricité, l'énergie solaire photovoltaïque est la plus élégante. Silencieuse et discrète, elle présente l'avantage de s'intégrer facilement à l'habitat (façades de bâtiments, toits). L'absence de pièces mécaniques mouvantes réduit l'entretien de ces systèmes à un minimum et leur fiabilité (durée de vie d'environ 25 ans) a rapidement favorisé leur utilisation dans le domaine des applications spatiales et en sites isolés (station de télécommunication, systèmes de navigation en mer).

L'énergie solaire est disponible partout sur la planète en des degrés divers et elle est entièrement renouvelable. Son apport est variable, au gré des jours et des saisons, mais elle est relativement prévisible. Sa puissance maximale est de 1kW/m^2 et, même si elle est

relativement diluée, son apport énergétique annuel pourrait répondre des milliers de fois à la consommation énergétique de la plupart des pays.

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est de plus en plus utilisée pour opérer diverses applications terrestres comme l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération et le pompage. Les systèmes PV ne nécessitent aucun apport extérieur de combustible, de plus, le générateur lui-même ne contient aucune pièce mobile et ne requiert donc pratiquement pas d'entretien. Par conséquent, les coûts récurrents d'opération et de maintenance sont relativement faibles. Pour ces raisons, cette source d'énergie convient particulièrement bien pour les utilisations en milieu rural où les populations sont réparties dans de petites communautés et où la demande énergétique est relativement faible.

L'objectif de notre travail est l'étude d'un modèle mathématique d'un panneau solaire et son implémente sur cible FPGA afin d'évaluer ses performances électriques.

Ce mémoire est divisé en quatre chapitres. Le premier chapitre sera consacré essentiellement sur les généralités d'un système photovoltaïques, sa modélisation, ces avantages ainsi que les contraintes et limites d'utilisation.

Le second chapitre est consacré à l'étude théorique et description d'un modèle de cellule photovoltaïque PV à une seule diode sans résistance parallèle, à l'utilisation de la fonction W de Lambert et au modèle mathématique (Natural Cubic Spline Method) d'un panneau solaire, enfin l'établissement du modèle empirique NCSM pour la facilité d'implémentation sur FPGA est envisagé.

Le troisième chapitre est consacré à la simulation, l'interprétation des résultats et les performances des caractéristiques courant-tension $I - V$ et puissance-tension $P - V$ pour les deux modèles mathématiques d'un panneau solaire KC200GT sous MATLAB afin de valider l'étude théorique et la comparaison entre les deux modèles mathématiques.

Enfin dans le quatrième chapitre l'implémentation des résultats obtenus du modèle mathématique optimale NCSM est réalisée.

Chapitre 1 : système photovoltaïque

1.1 Introduction

De nos jours, le réchauffement climatique est le plus grand problème de l'humanité. Dans le but de préserver la terre, l'homme a opté pour une énergie moins néfaste dite énergie verte. Dans la nature il existe plusieurs sources de ce type d'énergie, la plus utilisée est l'énergie solaire (photovoltaïque).

Un système PV est constitué principalement d'un générateur photovoltaïque (panneaux solaires), d'un ensemble de batteries, d'un ou de plusieurs convertisseurs (continu-continu et un convertisseur continu-alternatif). Ce chapitre décrit les concepts de base d'un panneau solaire et de production d'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. [1]

1.2 L'effet photovoltaïque

Le principe est simple, c'est la transformation de la lumière en électricité via une photopile. En 1839, le physicien français Edmond Becquerel fut le premier à observer l'effet photovoltaïque. Mais, ce n'est qu'au milieu du vingtième siècle que les chercheurs de la compagnie Bell Téléphone, aux USA, parvient à fabriquer la première photopile. [2, 3]

Sachant que les rayons solaire sont constitués de photons véhiculant chacun une énergie E_{ph} qui répond, elle même, à la relation suivante:

$$E_{ph} = h \frac{c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Avec:

- E_{ph} : Est la quantité d'énergie ;
 h : Est la constante de Planck ;

c : Est la vitesse de la lumière ;

λ : Est la longueur d'onde.

D'après la relation (1.1), nous constatons que cette énergie est quantifiée selon la variation de la longueur d'onde. Donc le flux d'énergie solaire est transmis sous forme de rayonnements électromagnétiques dont les longueurs d'ondes sont différentes du corps noir dans l'espace, mais encore plus sur la terre telle que la montre la figure 1.1. [3]

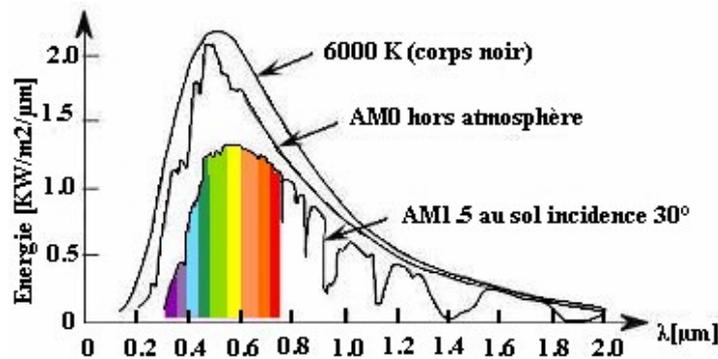


Figure 1. 1. Répartition spectrale du rayonnement solaire.

Nous concluons que le spectre de l'énergie solaire en atmosphère terrestre est décalé vers le rouge et l'infrarouge par rapport au spectre hors atmosphère [3].

Delà nous pouvons dire que les longueurs d'ondes du rayonnement solaire terrestre sont comprises entre $0,2 \mu\text{m}$ (Ultraviolet) et $4 \mu\text{m}$ (infrarouge) avec une énergie maximale pour un $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$, 97,5% de l'énergie solaire est comprise entre $0,2 \mu\text{m}$ et $2,5 \mu\text{m}$, et notamment, entre $0,4 \mu\text{m}$ et $0,78 \mu\text{m}$ qui correspondent au visible. [3]

Le tableau 1.1 donne les valeurs énergétiques des photons pour différents longueurs d'onde ainsi que les zones correspondantes au spectre lumineux.

$\lambda(\mu\text{m})$	$E_{\text{ph}}(\text{kw}/\text{m}^2/\mu\text{m})$	Zone
0,2	6,2	Ultraviolet

0,4	3,1	Visible Bleu
0,5	2,48	Visible jaune vert
1,78	1,59	Visible rouge
1	1,24	Infrarouge
2	0,62	Infrarouge
4	0,31	Infrarouge

Tableau 1. 1. Valeurs énergétiques des photons issues du spectre solaire.

1.3 La photopile

Elle est appelée aussi cellule solaire ou cellule PV, est fabriquée par des matériaux semi-conducteurs. On peut la représenter comme étant une diode plate qui s'excite par la lumière.

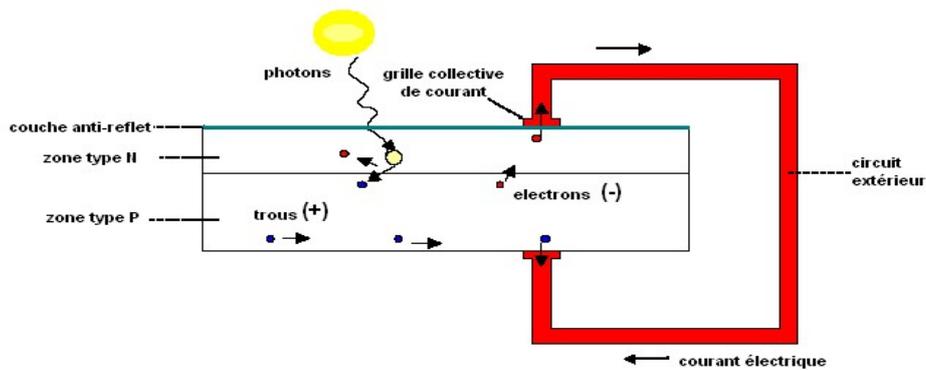


Figure 1. 2. Description d'une cellule photovoltaïque.

Si un photon (d'énergie suffisante) heurte un atome sur la partie négative de cette diode, un électron est excité et arraché de sa structure moléculaire, par conséquent on aura un électron libre sur cette partie de la diode. Une photopile est fabriquée de telle façon à ce que cet électron libre ne puisse se recombiner facilement avec un atome chargé positivement, avant qu'il n'ait accompli son travail en passant dans un circuit extérieur. La cellule PV produira de l'électricité à courant continu (CC), et son énergie produite sera fonction principalement de la lumière reçue par la photopile. [2]

1.3.1 Rendement de la cellule photovoltaïque

Le rendement de la cellule PV est un des critères de qualité de ce type de capteur. Ainsi, cette mesure est effectuée selon des normes précises en fixant un type de spectre lumineux, une pression et une température de fonctionnement.

Nous parlons ici uniquement de rendement global de conversion d'énergie des photons en électrons traduit par la puissance électrique délivrée par les cellules PV, par rapport à un éclairage de 1000 W/m^2 pour pouvoir ainsi effectuer des comparaisons objectives des diverses performances de cellules.

De même le rendement dépend du matériau utilisé et des pertes liées à la technologie mise en œuvre pour réaliser une cellule. [3]

1.3.2 Circuit équivalent et modèle mathématique

Pour modéliser une cellule photovoltaïque, il existe plusieurs modèles électriques empiriques simples, qui sont les plus proches du générateur PV. Actuellement le plus utilisé en raison de la qualité des résultats obtenus, c'est le modèle à une diode. [12]

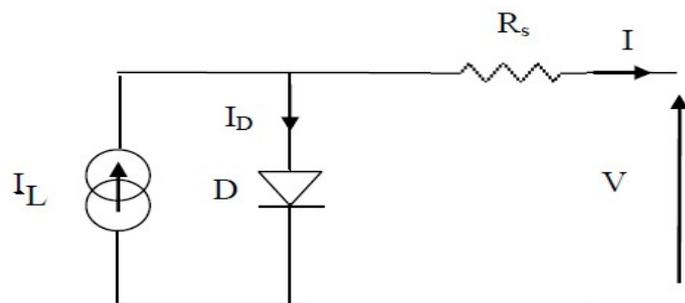


Figure 1. 3. Circuit équivalent d'une cellule solaire.

La caractéristique $I - V$ d'une cellule photovoltaïque est décrite par les équations suivantes :

$$I = I_L - I_D \quad (1.2)$$

Avec:

I : Est le courant produit par le PV[A];

I_L : Est le courant de lumière[A];

I_D : Est le courant de diode[A].

$$I_D = I_0 \left[\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma k T_c} \right) - 1 \right] \quad (1.3)$$

Avec:

I_0 : Le courant de saturation inverse réelle [A];

- q : La charge de l'électron $q = 1.6021 \cdot 10^{-19} [C]$;
 V : La tension produite par le PV [V];
 R_s : La résistance série [Ohm];
 γ : Le facteur de forme;
 k : La constante de Boltzmann $k = 1.3854 \cdot 10^{-23} [JK^{-1}]$;
 T_c : La température effective de la cellule[K].

$$I_0 = I_{0,R} \left(\frac{T_c}{T_{c,R}} \right)^3 \exp \left[\left(\frac{q \varepsilon_G}{ka} \right) \left(\frac{1}{T_{c,R}} - \frac{1}{T_c} \right) \right] \quad (1.4)$$

Avec:

- $I_{0,R}$: Le courant de saturation inverse aux conditions de référence [A] ;
 ε_G : L'énergie de gap [C];
 a : Facteur d'idéalité.

$$I_{0,r} = \frac{I_{sc}}{\exp \left(\frac{V_{oc}}{A V_t} \right) - 1} \quad (1.5)$$

Avec:

- V_t : la tension thermique[V];
 V_{oc} : Tension circuit ouvert[V];
 I_{sc} : Le courant de court circuit[A].

$$\gamma = a \cdot NCS \cdot NS \quad (1.6)$$

Avec:

- NCS : Le nombre de cellules connectées en série par module;
 NS : Le nombre de modules connectés en série.

$$V_t = \frac{NS k T_c}{q} \quad (1.7)$$

$$I_L = \left(\frac{G}{G_R} \right) (I_{L,R} + \mu_{ISC} (T_c - T_{c,R})) \quad (1.8)$$

Avec:

- G : L'insolation réelle [W/m^2] ;

- G_r : L'insolation aux conditions de référence [W/m^2];
 $I_{L,r}$: Le courant de lumière aux conditions de référence [A];
 μ_{Isc} : coefficient de température de court-circuit.

$$I_{L,r} = \frac{R_p + R_s}{R_p} I_{sc} \quad (1.9)$$

R_p est la résistance parallèle. Dans le modèle étudié $R_s \ll R_p$ donc $I_{L,r} \approx I_{sc}$

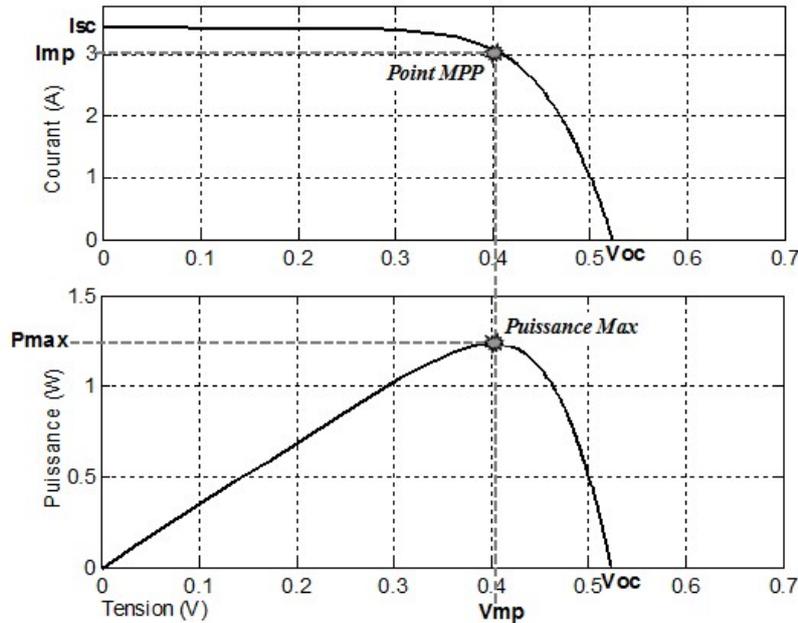


Figure 1. 4. Caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'une cellule solaire pour un ensoleillement et une température donnés.

1.3.3 Influence de l'ensoleillement et de la température

Le courant produit par la cellule PV est pratiquement proportionnel aux radiations des rayons solaires. Par contre, la tension aux bornes de la jonction varie peu, car elle est en fonction de la différence de potentiel à la jonction N – P du matériau lui-même [5]. La tension de circuit ouvert diminuera légèrement avec l'éclairement. De là on conclut que:

- La puissance optimale de la cellule est pratiquement proportionnelle à l'éclairement.
- Les points de puissance maximale se situent plus ou moins à la même tension.

L'influence de la température est non négligeable sur la caractéristique courant-tension d'un semi-conducteur. Pour une variation de température, on peut voir que la tension change considérablement, contrairement au courant qui reste constant. [2]

1.4 Le module photovoltaïque

Un module PV est un ensemble, de cellules élémentaires concaténées les unes aux autres. Le mode d'assemblage de ces cellules (en parallèle ou en série), nous permis de définir les caractéristiques du module PV.

Les deux types de regroupement sont utilisés selon les besoins voulus. Par exemple, en associant des cellules PV en série nous aurons un ajout des tensions de chaque cellule. Par contre si les cellules sont connectées en parallèle elles nous donnent un ajout des intensités de chaque cellule. [5]

Les figure 1.5 et 1.6, représente respectivement un regroupement en série et en parallèle des cellules PV avec leur caractéristique courant et tension.

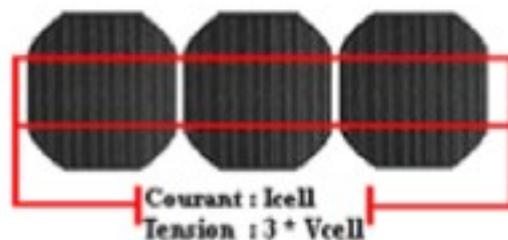


Figure 1. 5. Cellules connectées en série avec leur caractéristique courant-tension.



Figure 1. 6. Cellules connectées en parallèle avec leur caractéristique courant-tension.

1.5 Le champ photovoltaïque

Un champ PV est un ensemble, des modules PV concaténées les uns aux autres. Ils peuvent être branchés soit en série pour augmenter leur tension d'utilisation ou en parallèle pour augmenter leur courant.

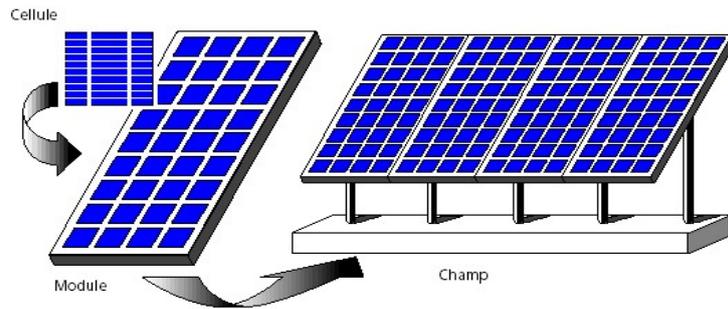


Figure 1. 7. Composantes d'un champ de modules PV.

L'énergie délivrée par le champ peut être utilisée pour charger des batteries qui fourniront l'électricité au moment voulu. Elle peut aussi être utilisée en reliant directement les modules à la charge sans les batteries.

1.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté des généralités sur le système PV. La mise en évidence ainsi que la conception de système PV optimisé est par nature difficile. En effet, côté source, pour un générateur PV, la production de puissance varie fortement en fonction de l'éclairement G et de la température T_c .

Chapitre 2 : Description d'un modèle mathématique d'un panneau solaire

2.1 Introduction

Pour représenter un phénomène physique, il existe plusieurs modèles électriques empiriques. Mais, pour les phénomènes les plus compliqués, il existe des modèles mathématiques, qui nous permis de résoudre ce problème.

L'interpolation joue un rôle important dans l'analyse numérique classique. Une des méthodes la plus courante de représenter les courbes, et les surfaces géométrique est l'interpolation spline cubique avec ses fonctions paramétriques. [11]

2.2 La méthode naturelle cubique spline (MNCS)

Soit $f(x)$ une fonction définie dans l'intervalle $[x_0, x_n]$.

Donc pour chaque x_i nous avons $f(x_i)$ avec $i = 0, 1, 2, \dots, n$

$f(x)$	$f(x_0)$	$f(x_1)$	$f(x_2)$...	$f(x_n)$
x	x_0	x_1	x_2	...	x_n

Pour aboutir au résultat envisagé, nous utilisons l'Interpolation de Lagrange, sur un polynôme de degré n , avec $n + 1$ coefficients, malheureusement, de tels polynômes peuvent posséder de grandes oscillations, et le terme d'erreur peut être difficile à construire et à estimer. [13]

Comme son nom l'indique, la cubique spline Interpolation est réalisée en utilisant un polynôme de 3^{ème} degré. Ce dernier s'écrit comme suite:

$$p(x) = a + bx + cx^2 + dx^3 \quad (2.1)$$

Nous constatons qu'un polynôme de 3^{ème} degré est spécifié par quatre coefficients (a, b, c et d).

L'idée essentielle est d'adapter la fonction $f(x)$ par une fonction de la forme:[14]

$$S(X) = \begin{cases} S_1(x) & x_1 < x < x_2 \\ S_2(x) & x_2 < x < x_3 \\ \vdots & \\ S_{n-1}(x) & x_{n-1} < x < x_n \end{cases} \quad (2.2)$$

Où S_j est un polynôme du troisième degré défini par:[12]

$$S(x) = S_j(x) = a + b_j(x - x_j) + c_j(x - x_j)^2 + d_j(x - x_j)^3 \text{ si } x_j \leq x \leq x_{j+1} \quad (2.3)$$

Avec $j = 1, 2, \dots, n - 1$

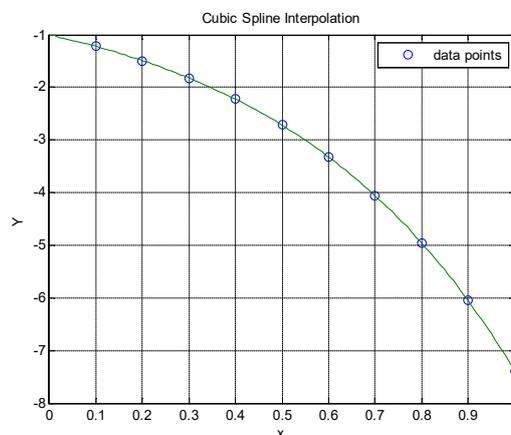


Figure 2. 1. Courbe d'interpolation spline cubique d'une fonction.

Nous venons de noter ici l'instrument dérivé premier et seconde de chaque pièce de la cubique spline:[14]

$$S_j(x) = a_j + b_j(x - x_j) + c_j(x - x_j)^2 + d_j(x - x_j)^3 \quad (2.4)$$

$$S'_j(x) = b_j + 2c_j(x - x_j) + 3d_j(x - x_j)^2 \quad (2.5)$$

$$S''_j(x) = 2c_j + 6d_j(x - x_j) \quad (2.6)$$

2.2.1 Propriété de la cubique spline

- S est un polynôme de 3^{ème} degré ;
- S_j est définie sur $[x_j, x_{j+1}]$ pour $j = 0, 1, \dots, N - 1$;
- $S(x_j) = f(x_j)$ pour $j = 0, 1, \dots, N$;
- $S'_{j+1}(x_j + 1) = f'(x_{j+1})$ pour $j = 0, 1, \dots, n - 2$;

- $S''_{j+1}(x_j + 1) = f'(x_{j+1})$ pour $j = 0, 1, \dots, n - 2$.

2.2.2 L'algorithme de la cubique spline

Supposant $f(x)$ une fonction complexe, ce qui rend la localisation du point optimal grâce à sa dérivée première difficile. En revanche, un polynôme d'interpolation (MNCS) a une forme beaucoup plus simple que $f(x)$.

Soit $f(x)$ une fonction définie dans l'intervalle $[x_0, x_n]$.

Delà, pour calculer les coefficients du polynôme. Nous devons suivre l'algorithme de cette méthode, qui est donné ci-dessous: [12]

$$a_0 = f(x_0); a_1 = f(x_1) \cdots a_n = f(x_n).$$

$$(1) \text{ pour } i = 0, 1, \dots, n - 1$$

$$\text{on pose } h_i = x_{i+1} - x_i \quad (2.7)$$

$$(2) \text{ pour } i = 0, 1, \dots, n - 1$$

$$\text{on pose } \alpha_i = \frac{3}{h_i}(a_{i+1} - a_i) - \frac{3}{h_{i-1}}(a_i - a_{i-1}), \quad (2.8)$$

$$(3) \text{ on pose } I_0 = 1, \quad \mu_0 = 0, \quad Z_0 = 0,$$

$$(4) \text{ pour } i = 0, 1, \dots, n - 1$$

$$\text{on pose } I_i = 2(x_{i+1} - x_{i-1}) - h_{i-1} \mu_{i-1}, \quad (2.9)$$

$$\mu_i = h_i / I_i, \quad (2.10)$$

$$Z_i = (\alpha_i - h_{i-1} Z_{i-1}) / I_i \quad (2.11)$$

$$(5) \text{ on pose } I_n = 1, \quad Z_n = 0, \quad c_n = 0,$$

$$(6) \text{ pour } j = n - 1, n - 2, \dots, 0$$

$$\text{on pose } c_n = Z_j - \mu_j c_{j+1} \quad (2.12)$$

$$b_j = \frac{(a_{j+1} - a_j)}{h_j} - \frac{h_j(c_{j+n} + 2c_j)}{3} \quad (2.13)$$

$$d_j = d_j h_i (c_{j+n} + c_j) / 3h_j, \quad (2.14)$$

(7) pour $i = 0, 1, \dots, n - 1$

Afficher les valeurs: $a_j, b_j, c_j, d_j,$

arrêt de l'algorithme

A partir des valeurs $a_j, b_j, c_j, d_j,$ un polynôme cubique $S(x)$ est construit:

$$S(x) = S_j(x) = a + b_j(x - x_j) + c_j(x - x_j)^2 + d_j(x - x_j)^3 \text{ si } x_j \leq x \leq x_{j+1}$$

$S(x)$ Contient donc un certain nombre de fonctions par morceaux à chaque fonction décrivant la caractéristique de précision dans l'intervalle déterminé.

2.3 Modélisation du module KC200GT par la MNCS

2.3.1 Le modèle mathématique Lambert

D'après ce que nous avons vu, dans le premier chapitre. Un générateur PV est modélisé par un circuit électrique à une diode. Son expression mathématique est donnée par la relation (2.15):

$$I = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma k T_c}\right) - 1 \right] \quad (2.15)$$

De cette équation nous déduisons l'équation suivante:

$$I + I_0 \exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma k T_c}\right) = I_L + I_0 \quad (2.16)$$

Nous remplaçons I par son expression dans l'équation (2.15).

$$I + I_0 \exp\left(\frac{q\left(V + I_L R_s + I_0 R_s - I_0 \exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma k T_c}\right)\right)}{\gamma k T_c}\right) = I_L + I_0 \quad (2.17)$$

A partir de l'équation (2.16) et (2.17) nous aurons la relation suivante:

$$\frac{q(V + IR_s)}{\gamma k T_c} = \frac{q \left(V + I_L R_s + I_0 R_s - I_0 \exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma k T_c} \right) \right)}{\gamma k T_c} \quad (2.18)$$

De (2.17) nous obtiendrons la relation (2.18).

$$\frac{q(V + IR_s)}{\gamma k T_c} + \frac{I_0 \exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma k T_c} \right)}{\gamma k T_c} = \frac{q(V + I_L R_s + I_0 R_s)}{\gamma k T_c} \quad (2.19)$$

Nous constatons, que nous pouvons calculer $I_L + I_0$ à partir de l'équation (2.19).

$$I_L + I_0 = \left(\frac{\frac{q(V + IR_s)}{\gamma k T_c} + \frac{I_0 \exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma k T_c} \right)}{\gamma k T_c}}{q R_s} \right) \gamma k T_c - \frac{V}{R_s} \quad (2.20)$$

Nous remplaçons $I_L + I_0$ par son expression de la relation (2.16).

$$I + I_0 \exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma k T_c} \right) = \left(\frac{\frac{q(V + I_L R_s + I_0 R_s)}{\gamma k T_c}}{q R_s} \right) \gamma k T_c - \frac{V}{R_s} \quad (2.21)$$

De la relation (2.20) nous calculons I.

$$I = \left(\frac{\frac{q(V + I_L R_s + I_0 R_s)}{\gamma k T_c}}{q R_s} \right) \gamma k T_c - \frac{V}{R_s} - I_0 \exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma k T_c} \right) \quad (2.22)$$

$$I = \frac{-qV + \left(-\frac{q R_s I_0 \exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma k T_c} \right)}{\gamma k T_c} + \left(\frac{q(V + R_s I_L + R_s I_0)}{\gamma k T_c} \right) \right) \gamma k T_c}{q R_s} \quad (2.23)$$

Nous sommes confrontés à un problème de taille. Ou I est exprimé en fonction de I. Pour résoudre ce problème, nous utiliserons les propriétés de la fonction Lambert W.[10]

La fonction Lambert W est la fonction inverse de la fonction We^W . Le mérite de cette découverte revient à Johann Lambert, Zurich, 1758. [15]

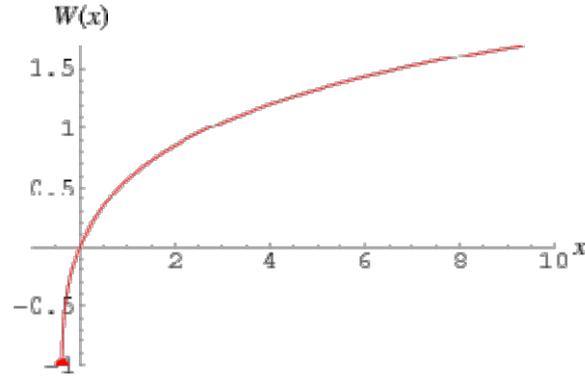


Figure 2. 2. courbe de la fonction Lambert W.

$$\frac{q R_s I_0 \exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma k T_c}\right)}{\gamma k T_c} = \text{LambertW}\left(\frac{q R_s I_0 \exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma k T_c}\right)}{\gamma k T_c} \exp\left(\frac{q R_s I_0 \exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma k T_c}\right)}{\gamma k T_c}\right)\right) \quad (2.24)$$

$$I = \frac{-qV + \left(-\text{LambertW}\left(\frac{q R_s I_0 \exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma k T_c}\right)}{\gamma k T_c} \exp\left(\frac{q R_s I_0 \exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma k T_c}\right)}{\gamma k T_c}\right)\right) + \left(\frac{q(V + R_s I_L + R_s I_0)}{\gamma k T_c}\right)\right) \gamma k T_c}{q R_s} \quad (2.25)$$

Si nous simplifierons plus la formule (2.25) nous obtiendrons l'équation (2.26).

$$I = \frac{-qV + \left(-\text{LambertW}\left(\frac{q R_s I_0 \exp\left(\frac{q\left(V + IR_s + R_s I_0 \exp\left(\frac{q(V + IR_s)}{\gamma k T_c}\right)\right)}{\gamma k T_c}\right)}{\gamma k T_c}\right) + \left(\frac{q(V + R_s I_L + R_s I_0)}{\gamma k T_c}\right)\right) \gamma k T_c}{q R_s} \quad (2.26)$$

Pour obtenir un résultat plus concret, nous injectons la relation (2.19) dans (2.26).[12]

$$I = \frac{-qV + \left(-\text{LambertW}\left(\frac{q R_s I_0 \exp\left(\frac{q(V + R_s I_L + R_s I_0)}{\gamma k T_c}\right)}{\gamma k T_c}\right) + \left(\frac{q(V + R_s I_L + R_s I_0)}{\gamma k T_c}\right)\right) \gamma k T_c}{q R_s} \quad (2.27)$$

2.3.2 Caractéristique du module KC200GT

La technologie avancée Kyocera de traitement des cellules et des installations de production automatisée permet de produire un module PV monocristallin très efficace. Le rendement de conversion de la cellule solaire Kyocera est plus de 16%. Ces cellules sont encapsulées entre une couverture en verre trempé et une feuille arrière pour fournir une protection efficace dans des conditions environnementales plus sévère. [16]

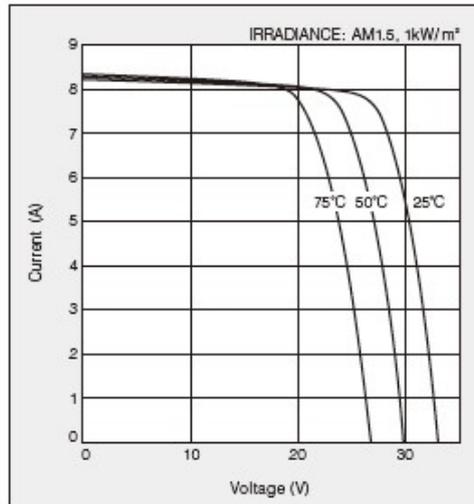


Figure 2. 3. Caractéristique courant-tension du module photovoltaïque à KC200GT à différentes températures.

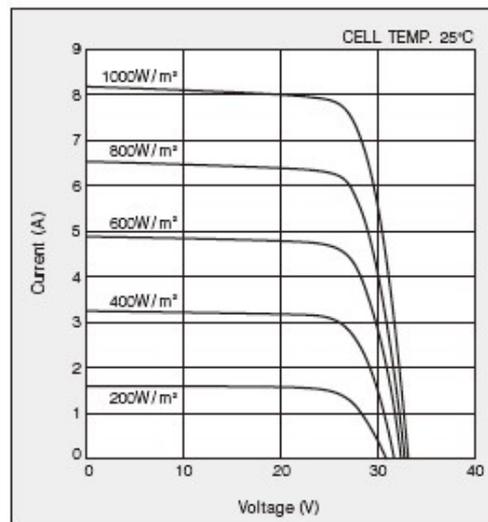


Figure 2. 4. Caractéristique courant-tension du module photovoltaïque à KC200GT à différents irradiation.

Les figures 2.3 et 2.4, montrent les caractéristiques électriques (courant-tension) du module PV KC200GT, en fonction de la température et de l'insolation respectivement.

Alors que le tableau 2.1, donne les caractéristiques techniques du module PV KC200GT.

▪ Performance électrique dans des conditions d'essai standard (*STC)	
Puissance maximale (P_{max})	200W (+10% / -5%)
Tension de la puissance maximale (V_{mpp})	26.3 V
courant de la puissance maximale (I_{mpp})	7.61 A
Tension en circuit ouvert (V_{oc})	32.9 V
Courant en court-circuit (I_{sc})	8.21 A
Tension maximal du système	600 V
Constante d'idéalité des diodes a	1.3
la saturation inverse nominale $I_{o,n}$	$9.825 \cdot 10^{-8}$ A
Coefficient de température de V_{oc} (Kv)	-0.1230 V/K
Coefficient de température de I_{sc} (KI)	0.0032 A/K
Nombre de cellule par module	54

Tableau 2. 1. Caractéristique de panneau solaire KC200GT.

2.3.3 La modélisation par la MNCS

L'équation (2.27) contient la fonction exponentielle, ce qui rend difficile la localisation du point optimal grâce à sa dérivée première. Donc, pour résoudre ce problème, nous utiliserons la MNCS. [12]

Sachant que les performances d'un PV dépendant de deux paramètres. A savoir, la température et l'insolation. Dans cette partie, nous allons étudier quatre cas.

- Premier cas: (condition de références)

température $25C^0$
insolation 1000 W/m^2

- Second cas:

Température $35C^0$
Insolation 1000 W/m^2

- Troisième cas:

température $25C^0$
insolation 800 W/m^2

- Quatrième cas:

Température 35 C⁰

Insolation G = 800 w/m²

De même, un module PV est caractérisé par sa puissance et le courant produit. Delà, nous aurons huit formules à développer.

Au début, nous déterminerons les valeurs de I à partir du modèle Lambert (donnée par l'équation 2.26). Alors que, les valeurs de P sont obtenues à partir de l'équation suivante:

$$P = I \times V \quad (2.27)$$

En suite, nous appliquons l'algorithme de la MNCS. Dans le but est de, déterminer les coefficients (a_j, b_j, c_j et d_j) des polynômes d'interpolation. Ces coefficients, nous permettront de formuler les modèles finaux des caractéristiques I – V et P – V.

Une fois la modélisation finie. Nous devons dire si le modèle est de bonne ou mauvaise qualité. Pour cela nous devons calculer le coefficient de corrélation R pour chaque modèle. L'expression de R est la suivante:[12]

$$R^2 = \frac{S_{XY}^2}{S_{XX}S_{YY}} \quad \text{et } 0 \leq R \leq 1 \quad (2.28)$$

$$S_{XY} = \sum ((X - m_X)(Y - m_Y)) \quad (2.29)$$

$$S_{XX} = \sum (X - m_X)^2 \quad (2.30)$$

$$S_{YY} = \sum (Y - m_Y)^2 \quad (2.31)$$

Avec:

X : Données de la simulation (modèle Lambert);

Y : Données de la modélisation (MNCS);

m_X : La moyenne de X ;

m_Y : La moyenne de Y.

En premier lieu, nous modélisons un panneau PV (KC200GT), aux conditions de références (la température T_c = 25 C⁰ et une insolation G = 1000 w/m²).

Les tableaux 2.2 et 2.3, déterminent les caractéristiques I – V et P – V, respectivement, du panneau PV aux conditions de références.

V	I
16.4	8.24
17.9	8.24

V	P
16.4	135.13
17.9	147.49

19.4	8.19
20.9	8.18
22.4	8.14
23.9	8.05
25.4	7.87
26.9	7.42
28.4	6.67
29.9	5.24
31.4	3.02

Tableau 2. 2. Données de I – V aux conditions de références.

19.4	158.88
20.9	170.96
22.4	182.33
23.9	192.39
25.4	199.89
26.9	199.59
28.4	189.42
29.9	156.67
31.4	94.82

Tableau 2. 3. Données de P – V aux conditions de références.

Les tableaux 2.4 et 2.5, sont les résultats de la MNCS, donc ils contiennent les coefficients des polynômes d'interpolation, pour le courant et la puissance, respective aux conditions de références.

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
8.24	-0.0318	0	0.0023
8.20	-0.0164	0.0102	-0.0025
8.19	-0.0025	-0.001	-0.0012
8.18	-0.0136	-0.0064	-0.0015
8.14	-0.0432	-0.0134	0.0014
8.05	-0.0735	-0.0068	-0.0161
7.87	-0.2027	-0.0793	0.0096

7.42	-0.3756	-0.0359	-0.0314
6.67	-0.695	-0.177	0.0032
5.24	-1.2044	-0.1626	-0.0141
3.02	-1.7873	-0.226	0.0502

Tableau 2. 4. Les coefficients du polynôme d'interpolation aux conditions de références.

a	b	c	d
135.13	7.6840	0	0.0350
147.49	7.9201	0.1574	-0.0380
158.88	8.1358	-0.0136	-0.0288
170.96	7.9009	-0.1430	-0.0461
182.33	7.1607	-0.3505	0.0315
192.39	6.3223	-0.2085	-0.4478
199.89	2.6742	-2.2235	0.2049
199.59	-2.6132	-1.3015	-0.9842
189.42	-13.1613	-5.7306	-0.0344
156.67	-30.5855	-5.8855	-0.808
94.82	-53.6967	-9.5219	2.1160

Tableau 2. 5. Les coefficients du polynôme d'interpolation aux conditions de références.

$$I(V) = \begin{cases} 8.24 & 0 \leq V < 16.4 \\ 8.24 - 0.0318(V - 16.4) + 0.0023(V - 16.4)^3 & 16.4 \leq V < 17.9 \\ 8.24 - 0.0164(V - 17.9) + 0.0102(V - 17.9)^2 - 0.0025(V - 17.9)^3 & 17.9 \leq V < 19.4 \\ 8.19 - 0.0025(V - 19.4) - 0.001(V - 19.4)^2 - 0.0012(V - 19.4)^3 & 19.4 \leq V < 20.9 \\ 8.18 - 0.0136(V - 20.9) - 0.0064(V - 20.9)^2 - 0.0015(V - 20.9)^3 & 20.9 \leq V < 22.4 \\ 8.14 - 0.0432(V - 22.4) - 0.0134(V - 22.4)^2 + 0.0014(V - 22.4)^3 & 22.4 \leq V < 23.9 \\ 8.05 - 0.0735(V - 23.9) - 0.0068(V - 23.9)^2 - 0.0161(V - 23.9)^3 & 23.9 \leq V < 25.4 \\ 7.87 - 0.2027(V - 25.4) - 0.0793(V - 25.4)^2 + 0.0096(V - 25.4)^3 & 25.4 \leq V < 26.9 \\ 7.42 - 0.3756(V - 26.9) - 0.0359(V - 26.9)^2 - 0.0314(V - 26.9)^3 & 26.9 \leq V < 28.4 \\ 6.67 - 0.695(V - 28.4) - 0.177(V - 28.4)^2 + 0.0032(V - 28.4)^3 & 28.4 \leq V < 29.9 \\ 5.24 - 1.2044(V - 29.9) - 0.1626(V - 29.9)^2 - 0.0141(V - 29.9)^3 & 29.9 \leq V < 31.4 \\ 3.02 - 1.7873(V - 31.4) - 0.226(V - 31.4)^2 + 0.0502(V - 31.4)^3 & 31.4 \leq V < 32.9 \end{cases} \quad (2.32)$$

$$P(V) = \begin{cases} 8.24 V & 0 \leq V < 16.4 \\ 135.13 + 7.684(V - 16.4) + 0.035(V - 16.4)^3 & 16.4 \leq V < 17.9 \\ 147.49 + 7.9201(V - 17.9) + 0.1574(V - 17.9)^2 - 0.0380(V - 17.9)^3 & 17.9 \leq V < 19.4 \\ 158.88 + 8.1358(V - 19.4) - 0.0136(V - 19.4)^2 - 0.0288(V - 19.4)^3 & 19.4 \leq V < 20.9 \\ 170.96 + 7.9009(V - 20.9) - 0.1430(V - 20.9)^2 - 0.0461(V - 20.9)^3 & 20.9 \leq V < 22.4 \\ 182.33 + 7.1607(V - 22.4) - 0.3505(V - 22.4)^2 - 0.4478(V - 22.4)^3 & 22.4 \leq V < 23.9 \\ 192.39 + 6.3223(V - 23.9) - 0.2085(V - 23.9)^2 - 0.4478(V - 23.9)^3 & 23.9 \leq V < 25.4 \\ 199.89 + 2.6742(V - 25.4) - 2.2235(V - 25.4)^2 + 0.2049(V - 25.4)^3 & 25.4 \leq V < 26.9 \\ 199.59 - 2.6132(V - 26.9) - 1.3015(V - 26.9)^2 - 0.0344(V - 26.9)^3 & 26.9 \leq V < 28.4 \\ 189.42 - 13.1613(V - 28.4) - 5.7306(V - 28.4)^2 - 0.0344(V - 28.4)^3 & 28.4 \leq V < 29.9 \\ 156.67 - 30.5855(V - 29.9) - 5.8855(V - 29.9)^2 - 0.808(V - 29.9)^3 & 29.9 \leq V < 31.4 \\ 94.82 - 53.6967(V - 31.4) - 9.5219(V - 31.4)^2 + 2.1160(V - 31.4)^3 & 31.4 \leq V < 32.9 \end{cases} \quad (2.33)$$

Les équations 2.32 et 2.33, sont des modèles par la MNCS des caractéristiques I – V et P – V respectivement, du panneau PV aux conditions de références.

Les tableaux 2.6 et 2.7, déterminent les caractéristiques I – V et P – V, respective, données par le modèle Lambert (X) et la modélisation par la MNCS (Y). Dont le but, de réaliser un test de qualité.

V	X	Y
2.65	8.21	8.24
11.95	8.2098	8.24
16	8.2081	8.24
18.64	8.2017	8.2225
24.13	8.0397	8.0325

26.6	7.5775	7.5221
30.58	4.3456	4.3413
32.9	0	-0.0025
<i>moyenne:</i>	6.599	6.6048

Tableau 2. 6. Les données de la caractéristique I – V pour les conditions de référence.

V	X	Y
2.65	21.7565	21.836
11.95	98.1071	98.468
16	131.3296	131.184
18.64	152.8796	153.4216
24.13	193.9979	193.3446
26.6	201.5615	200.2512
30.58	132.8884	132.8963
32.9	0	-0.0013
<i>moyenne:</i>	116.565	114.05

Tableau 2. 7. Les données de la caractéristique P – V pour les conditions de référence.

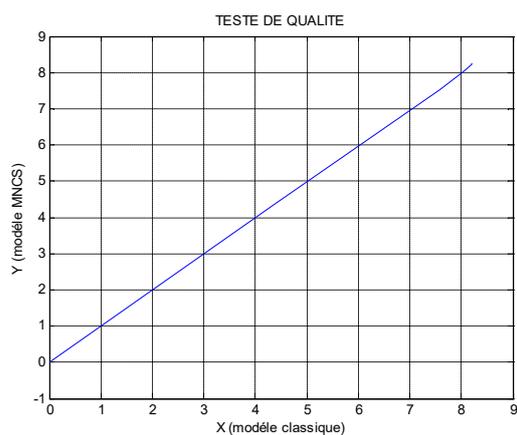


Figure 2. 5. Distribution des données du tableau 2.6.

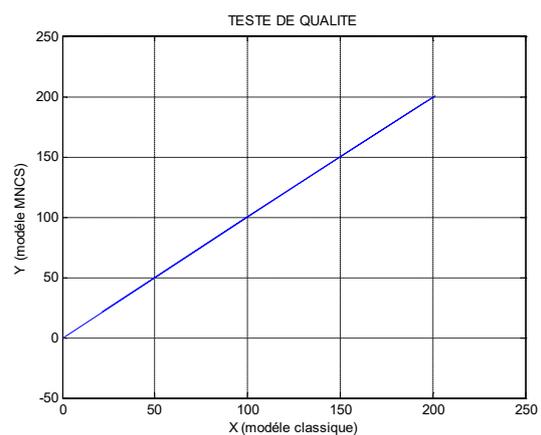


Figure 2. 6. Distribution des données du tableau 2.7.

Les figures 2.5 et 2.6, montrent la distribution des données des tableaux 2.6 et 2.7, respectivement. Nous constatons que les deux figures représentent une droite (figure 2.6 contient deux droites superposées).

Pour le tableau 2.6 :

$$S_{XX} = 62.0055$$

$$S_{YY} = 62.2982$$

$$S_{XY} = 62.1487$$

$$R^2 = \frac{62.1487^2}{62.2982 \cdot 62.0055} = 0.9999$$

Pour le tableau 2.7:

$$S_{XX} = 37940.2009$$

$$S_{YY} = 37670.4183$$

$$S_{XY} = 37781.5265$$

$$R^2 = \frac{37781.5265^2}{37670.4183 \cdot 37940.2009} = 0.9987$$

Nous remarquons, que $R^2 \rightarrow 1$. Donc avec ce résultat constatations faites à partir des figures 2.6 et 2.7. Nous pouvons dire, que la modélisation par la MNCS, du panneau KC200GT, aux conditions de références, est de bonne qualité.

La seconde approche, consiste à modéliser un panneau PV (KC200GT), pour une température $T_c = 25 \text{ C}^0$ et une insolation $G = 800 \text{ w/m}^2$.

Les tableaux 2.8 et 2.9, déterminent les caractéristiques $I - V$ et $P - V$, respectivement, du panneau PV, pour une température $T_c = 25 \text{ C}^0$ et une insolation $G = 800 \text{ w/m}^2$.

V	I
16.4	6.6
17.9	6.56
19.4	6.55
20.9	6.54
22.4	6.51
23.9	6.44
25.4	6.29
26.9	5.95
28.4	5.52
29.9	4.02

V	P
16.4	108.24
17.9	117.42
19.4	127.07
20.9	136.68
22.4	145.82
23.9	153.91
25.4	159.76
26.9	160.05
28.4	156.76
29.9	120.19

31.4	2
------	---

Tableau 2. 8. Données de $I - V$ pour une température $T_c = 25\text{ C}^0$ et une insolation $G = 800\text{ w/m}^2$.

31.4	62.8
------	------

Tableau 2. 9. Données de $P - V$ pour une température $T_c = 25\text{ C}^0$ et une insolation $G = 800\text{ w/m}^2$.

Les tableaux 2.10 et 2.11, sont les résultats de la MNCS, donc ils contiennent les coefficients des polynômes d'interpolation, pour le courant et la puissance, respective.

a	b	c	d
6.6	-0.0319	0	0.0023
6.56	-0.0162	0.0104	-0.0027
6.55	-0.0032	-0.0018	-0.0003
6.54	-0.0109	-0.0033	-0.0019
6.51	-0.0334	-0.0117	0.0019
6.44	-0.0557	-0.0032	-0.0176
6.29	-0.1838	-0.0823	0.0358
5.95	-0.1889	0.0789	-0.096
5.52	-0.6005	-0.3533	0.058
4.02	-1.2691	-0.0925	0.0272
2	-1.3631	0.0298	-0.0066

Tableau 2. 10. Les coefficients du polynôme d'interpolation ($T_c = 25\text{ C}^0$ et $G = 800\text{ w/m}^2$).

a	b	c	d
108.24	6.0417	0	0.036
117.42	6.2847	0.162	-0.0431
127.07	6.4797	-0.032	-0.0094
136.68	6.3206	-0.0741	-0.0522
145.82	5.7460	-0.309	0.0499
153.91	5.1556	-0.0846	-0.5016
159.76	1.5157	-2.342	0.9733
160.05	1.0596	2.0379	-2.8035
156.76	-11.75	-10.5777	1.4385
120.19	-33.7735	-4.1046	0.74
62.8	-41.0922	-0.7745	0.1721

Tableau 2. 11. Les coefficients du polynôme d'interpolation ($T_c = 25\text{ C}^0$ et $G = 800\text{ w/m}^2$).

$$I(V) = \begin{cases} 6.6 & 0 \leq V < 16.4 \\ 6.6 - 0.0319(V - 16.4) + 0.0023(V - 16.4)^3 & 16.4 \leq V < 17.9 \\ 6.56 - 0.0162(V - 17.9) + 0.0104(V - 17.9)^2 - 0.0027(V - 17.9)^3 & 17.9 \leq V < 19.4 \\ 6.55 - 0.0032(V - 19.4) - 0.0018(V - 19.4)^2 - 0.0003(V - 19.4)^3 & 19.4 \leq V < 20.9 \\ 6.54 - 0.0109(V - 20.9) - 0.0033(V - 20.9)^2 - 0.0019(V - 20.9)^3 & 20.9 \leq V < 22.4 \\ 6.51 - 0.0334(V - 22.4) - 0.0117(V - 22.4)^2 + 0.0019(V - 22.4)^3 & 22.4 \leq V < 23.9 \\ 6.44 - 0.0557(V - 23.9) - 0.0032(V - 23.9)^2 - 0.0176(V - 23.9)^3 & 23.9 \leq V < 25.4 \\ 6.29 - 0.1838(V - 25.4) - 0.0823(V - 25.4)^2 + 0.0358(V - 25.4)^3 & 25.4 \leq V < 26.9 \\ 5.95 - 0.1889(V - 26.9) + 0.0789(V - 26.9)^2 - 0.096(V - 26.9)^3 & 26.9 \leq V < 28.4 \\ 5.52 - 0.6005(V - 28.4) - 0.3533(V - 28.4)^2 + 0.058(V - 28.4)^3 & 28.4 \leq V < 29.9 \\ 4.02 - 1.2691(V - 29.9) - 0.0925(V - 29.9)^2 + 0.0272(V - 29.9)^3 & 29.9 \leq V < 31.4 \\ 2 - 1.3631(V - 31.4) + 0.0298(V - 31.4)^2 - 0.0066(V - 31.4)^3 & 31.4 \leq V < 32.9 \end{cases} \quad (2.34)$$

$$P(V) = \begin{cases} 6.6V & 0 \leq V < 16.4 \\ 108.24 + 6.0417(V - 16.4) + 0.036(V - 16.4)^3 & 16.4 \leq V < 17.9 \\ 117.42 + 6.2847(V - 17.9) + 0.162(V - 17.9)^2 - 0.0431(V - 17.9)^3 & 17.9 \leq V < 19.4 \\ 127.07 + 6.4797(V - 19.4) - 0.032(V - 19.4)^2 - 0.0094(V - 19.4)^3 & 19.4 \leq V < 20.9 \\ 136.68 + 6.3206(V - 20.9) - 0.0741(V - 20.9)^2 - 0.0522(V - 20.9)^3 & 20.9 \leq V < 22.4 \\ 145.82 + 5.746(V - 22.4) - 0.309(V - 22.4)^2 + 0.0499(V - 22.4)^3 & 22.4 \leq V < 23.9 \\ 153.91 + 5.1556(V - 23.9) - 0.0846(V - 23.9)^2 - 0.5016(V - 23.9)^3 & 23.9 \leq V < 25.4 \\ 159.76 + 1.5157(V - 25.4) - 2.342(V - 25.4)^2 + 0.9733(V - 25.4)^3 & 25.4 \leq V < 26.9 \\ 160.05 + 1.0596(V - 26.9) + 2.0379(V - 26.9)^2 - 2.8035(V - 26.9)^3 & 26.9 \leq V < 28.4 \\ 156.76 - 11.75(V - 28.4) - 10.5777(V - 28.4)^2 + 1.4385(V - 28.4)^3 & 28.4 \leq V < 29.9 \\ 120.19 - 33.7735(V - 29.9) - 4.1046(V - 29.9)^2 + 0.74(V - 29.9)^3 & 29.9 \leq V < 31.4 \\ 62.8 - 41.0922(V - 31.4) - 0.7745(V - 31.4)^2 + 0.1721(V - 31.4)^3 & 31.4 \leq V < 32.9 \end{cases} \quad (2.35)$$

Les équations 2.34 et 2.3, sont des modèles par la MNCS des caractéristiques I – V et P – V respectivement, du panneau PV ($T_c = 25\text{ C}^0$ et $G = 800\text{ w/m}^2$).

Les tableaux 2.12 et 2.13, déterminent les caractéristiques I – V et P – V, respectivement, donnée par le modèle Lambert (X) et la modélisation par la MNCS (Y). Dont le but, de réaliser un test de qualité.

V	X	Y
2.32	6.568	6.6
6.3	6.568	6.6
14.82	6.5672	6.6
21.92	6.5264	6.5234
27.07	5.8998	5.9196
28.69	5.084	5.3175
31.49	1.8527	1.8775
32.9	0	0.0012
<i>moyenne:</i>	4.7582	4.9299

Tableau 2. 12. Les données de la caractéristique I – V ($T_c = 25\text{ C}^0$ et $G = 800\text{ w/m}^2$).

V	X	Y
2.32	15.3776	15.312

6.3	41.3784	41.58
14.82	97.3259	97.812
21.92	143.0586	142.9945
27.07	159.7075	160.2752
28.69	145.8599	152.4979
31.49	58.3415	59.0955
32.9	0	0.0002
<i>moyenne:</i>	82.6311	83.6958

Tableau 2. 13. Les données de la caractéristique P – V ($T_c = 25\text{ C}^0$ et $G = 800\text{ w/m}^2$).

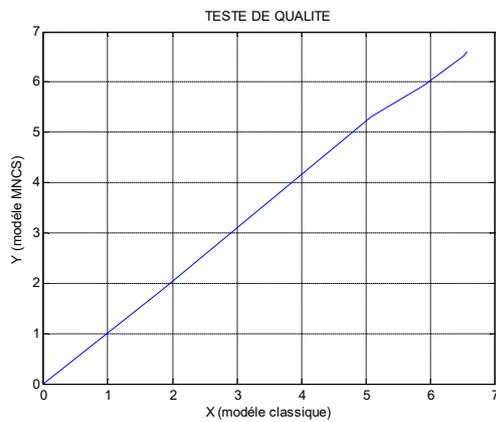


Figure 2. 7. Distribution des données du tableau 2.12.

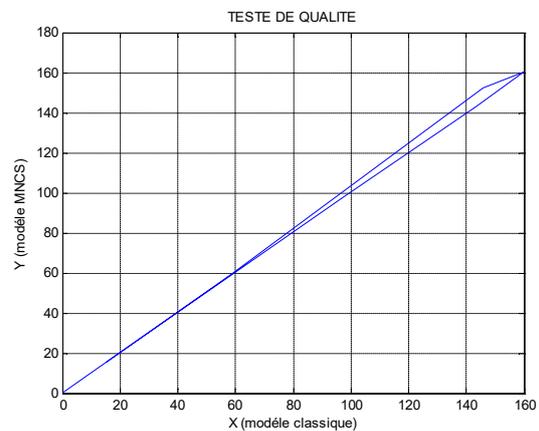


Figure 2. 8. Distribution des données du tableau 2.13.

Les figures 2.7 et 2.8, montrent la distribution des données des tableaux 2.12 et 2.13, respectivement. Nous constatons que la figure 2.7 représente plus ou moins une droite. Alors que la figure 2.8 représente deux droites superposés à certain niveau de la courbe.

Pour le tableau 2.12:

$$S_{XX} = 45.4415$$

$$S_{YY} = 45.6459$$

$$S_{XY} = 45.4605$$

$$R^2 = \frac{45.4415^2}{45.4605 \cdot 45.6459} = 0.9951$$

Pour le tableau 2.13:

$$S_{XX} = 27448.7743$$

$$S_{YY} = 28373.9493$$

$$S_{XY} = 27905.5873$$

$$R^2 = \frac{27905.5873^2}{28373.9493 \cdot 27448.7743} = 0.9998$$

Nous remarquons, que $R^2 \rightarrow 1$. Donc avec ce résultat et les constatations faites à partir des figures 2.7 et 2.8. Nous pouvons dire, que la modélisation par la MNCS, du panneau KC200GT, pour une température $T_c = 25C^0$ et une insolation $G = 800 \text{ w/m}^2$, est de bonne qualité.

Cette approche, consiste à modéliser un panneau PV (KC200GT), pour une température $T_c = 35 C^0$ et une insolation $G = 1000 \text{ w/m}^2$.

Les tableaux 2.14 et 2.15, déterminent les caractéristiques $I - V$ et $P - V$, respectivement, du panneau PV, pour une température $T_c = 35C^0$ et une insolation $G = 1000 \text{ w/m}^2$.

V	I
14.6	8.24
16.1	8.23
17.6	8.22
19.1	8.2
20.6	8.16
22.1	8.06
23.6	7.85
25.1	7.42
26.6	6.59
28.1	5.14
29.6	2.92

Tableau 2. 14. Données de $I - V$ pour une température $T_c = 35 C^0$ et une insolation $G = 1000 \text{ w/m}^2$.

V	P
14.6	120.3
16.1	132.5
17.6	144.67
19.1	156.62
20.6	168.09
22.1	178.12
23.6	185.26
25.1	186.24
26.6	175.29
28.1	144.43
29.6	85.84

Tableau 2. 15. Données de $P - V$ pour une température $T_c = 35 C^0$ et une insolation $G = 1000 \text{ w/m}^2$.

Les tableaux 2.16 et 2.17, sont les résultats de la MNCS, donc ils contiennent les coefficients des polynômes d'interpolation, pour le courant et la puissance, respectivement.

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
8.24	-0.007	0	0.0002
8.23	-0.0059	0.0007	-0.0008
8.22	-0.0092	-0.0029	0.0001
8.2	-0.0172	-0.0024	-0.0026
8.16	-0.0419	-0.014	-0.0017
8.06	-0.0952	-0.0216	-0.0055
7.85	-0.1971	-0.0464	-0.0089
7.42	-0.3962	-0.0863	-0.0123
6.59	-0.7381	-0.1416	-0.0071
5.14	-1.2113	-0.1738	-0.0036
2.92	-1.7568	-0.1899	0.0422

Tableau 2. 16. Les coefficients du polynôme d'interpolation ($T_c = 35\text{ C}^0$ et $G = 1000\text{ w/m}^2$).

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>
120.3	8.1302	0	0.0011
132.5	8.1376	0.0049	-0.0143
144.67	8.0555	-0.0596	-0.0003
156.62	7.8745	-0.0610	-0.0588
168.09	7.2945	-0.3257	-0.053
178.12	5.9595	-0.5644	-0.1586
185.26	3.1956	-1.2782	-0.2771
186.24	-2.5098	-2.5254	-0.4448
175.29	-13.0883	-4.5269	-0.3087
144.43	-28.7530	-5.9162	-0.4625
85.84	-49.6237	-7.9976	1.7772

Tableau 2. 17. Les coefficients du polynôme d'interpolation ($T_c = 35\text{ C}^0$ et $G = 1000\text{ w/m}^2$).

$$I(V) = \begin{cases} 8.240 & 0 \leq V < 14.6 \\ 8.24 - 0.007(V - 14.6) + 0.0002(V - 14.6)^3 & 14.6 \leq V < 16.1 \\ 8.23 - 0.0059(V - 16.1) + 0.0007(V - 16.1)^2 - 0.0008(V - 16.1)^3 & 16.1 \leq V < 18.6 \\ 8.22 - 0.0092(V - 18.6) - 0.0029(V - 18.6)^2 + 0.0001(V - 18.6)^3 & 18.6 \leq V < 20.1 \\ 8.2 - 0.0172(V - 20.1) - 0.0024(V - 20.1)^2 - 0.0026(V - 20.1)^3 & 20.1 \leq V < 21.6 \\ 8.16 - 0.0419(V - 21.6) - 0.014(V - 21.6)^2 - 0.0017(V - 21.6)^3 & 21.6 \leq V < 23.1 \\ 8.06 - 0.0952(V - 23.1) - 0.0216(V - 23.1)^2 - 0.0055(V - 23.1)^3 & 23.1 \leq V < 24.6 \\ 7.85 - 0.1971(V - 24.6) - 0.0464(V - 24.6)^2 - 0.0089(V - 24.6)^3 & 24.6 \leq V < 26.1 \\ 7.42 - 0.3962(V - 26.1) - 0.0863(V - 26.1)^2 - 0.0123(V - 26.1)^3 & 26.1 \leq V < 27.6 \\ 6.59 - 0.7381(V - 27.6) - 0.1416(V - 27.6)^2 - 0.0071(V - 27.6)^3 & 27.6 \leq V < 29.1 \\ 5.14 - 1.2113(V - 29.1) - 0.1738(V - 29.1)^2 - 0.0036(V - 29.1)^3 & 29.1 \leq V < 30.6 \\ 2.92 - 1.7568(V - 30.6) - 0.1899(V - 30.6)^2 + 0.0422(V - 30.6)^3 & 30.6 \leq V < 31.1 \end{cases} \quad (2.36)$$

$$P(V) = \begin{cases} 8.24 V & 0 \leq V < 14.6 \\ 120.3 + 8.1302(V - 14.6) + 0.0011(V - 14.6)^3 & 14.6 \leq V < 16.1 \\ 132.5 + 8.1376(V - 16.1) + 0.0049(V - 16.1)^2 - 0.0143(V - 16.1)^3 & 16.1 \leq V < 18.6 \\ 144.67 + 8.0555(V - 18.6) - 0.0596(V - 18.6)^2 - 0.0003(V - 18.6)^3 & 18.6 \leq V < 20.1 \\ 156.62 + 7.8745(V - 20.1) - 0.0610(V - 20.1)^2 - 0.0588(V - 20.1)^3 & 20.1 \leq V < 21.6 \\ 168.09 + 7.2945(V - 21.6) - 0.3257(V - 21.6)^2 - 0.053(V - 21.6)^3 & 21.6 \leq V < 23.1 \\ 178.12 + 5.9595(V - 23.1) - 0.5644(V - 23.1)^2 - 0.1586(V - 23.1)^3 & 23.1 \leq V < 24.6 \\ 185.26 + 3.1956(V - 24.6) - 1.2782(V - 24.6)^2 - 0.2771(V - 24.6)^3 & 24.6 \leq V < 26.1 \\ 186.24 - 2.5098(V - 26.1) - 2.5254(V - 26.1)^2 - 0.4448(V - 26.1)^3 & 26.1 \leq V < 27.6 \\ 175.29 - 13.0883(V - 27.6) - 4.5269(V - 27.6)^2 - 0.3087(V - 27.6)^3 & 27.6 \leq V < 29.1 \\ 144.43 - 28.7530(V - 29.1) - 5.9162(V - 29.1)^2 - 0.4625(V - 29.1)^3 & 29.1 \leq V < 30.6 \\ 85.84 - 49.6237(V - 30.6) - 7.9976(V - 30.6)^2 + 1.7772(V - 30.6)^3 & 30.6 \leq V < 31.1 \end{cases} \quad (2.37)$$

Les équations 2.36 et 2.37, sont des modèles par la MNCS des caractéristiques I – V et P – V respectivement, du panneau PV ($T_c = 35C^0$ et $G = 1000 \text{ w/m}^2$).

Les tableaux 2.18 et 2.19, déterminent les caractéristiques I – V et P – V, respectivement, données par le modèle Lambert (X) et la modélisation par la MNCS (Y). Dont le but, de réaliser un test de qualité.

V	X	Y
1.58	8.2418	8.24
4.97	8.2418	8.24
15.82	8.2356	8.2318
23.06	7.9523	8.1616
28.5	4.6308	5.8083
29.25	3.5129	4.9543
30.9	0.3589	2.377
31.1	0	0.005
<i>moyenne:</i>	5.1467	5.7522

Tableau 2. 18. Les données de la caractéristique I – V ($T_c = 35\text{ C}^0$ et $G = 1000\text{ w/m}^2$).

V	X	Y
1.58	13.022	13.0192
4.97	40.9617	40.9528
15.82	130.2871	130.2208
23.06	183.38	177.8807
28.5	131.9778	159.6186
29.25	102.7523	139.9882
30.9	11.09	70.281
31.1	0	-0.012
<i>moyenne:</i>	76.6838	91.5011

Tableau 2. 19. Les données de la caractéristique P – V ($T_c = 35\text{ C}^0$ et $G = 1000\text{ w/m}^2$).

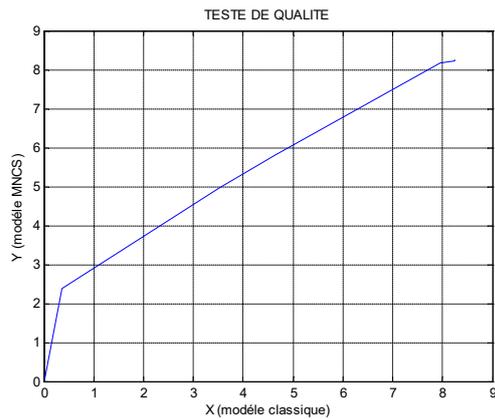


Figure 2. 9. Distribution des données du tableau 2.18.

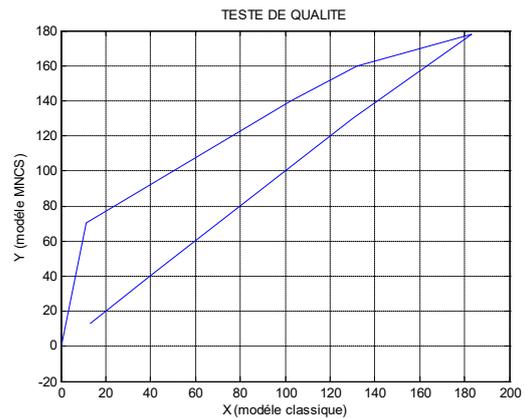


Figure 2. 10. Distribution des données du tableau 2.19.

Les figures 2.9 et 2.10, montrent la distribution des données des tableaux 2.18 et 2.19, respectivement. Nous constatons que la figure 2.9 représente une droite à certain moment de la courbe. Alors que la figure 2.10 représente deux droites non superposées.

Pour le tableau 2.19: $S_{XX} = 88.919$

$$S_{YY} = 69.5125$$

$$S_{XY} = 77.3241$$

$$R^2 = \frac{77.3241^2}{69.5125 \cdot 88.919} = 0.9673$$

Pour le tableau 2.20: $S_{XX} = 33506.2309$

$$S_{YY} = 26110.8645$$

$$S_{XY} = 29558.983$$

$$R^2 = \frac{29558.983^2}{26110.8645 \cdot 33506.2309} = 0.9986$$

Nous remarquons, que $R^2 \rightarrow 1$. Donc avec ce résultat et les constatations faites à partir des figures 2.9 et 2.10. Nous pouvons dire, que la modélisation par la MNCS, du panneau KC200GT, pour une température $T_c = 35 \text{ C}^0$ et une insolation $G = 1000 \text{ w/m}^2$ est de bonne qualité.

Pour la dernière modélisation du panneau PV (KC200GT). Nous avons opté, pour une température $T_c = 35 \text{ C}^0$ et une insolation $G = 800 \text{ w/m}^2$.

Les tableaux 2.20 et 2.21, déterminent les caractéristiques $I - V$ et $P - V$, respectivement, du panneau PV, pour une température $T_c = 35\text{ C}^0$ et une insolation $G = 800\text{ w/m}^2$.

V	I
14.2	6.6
15.7	6.58
17.2	6.57
18.7	6.56
20.2	6.54
21.7	6.47
23.2	6.33
24.2	6.03
26.1	5.43
27.7	4.32
29.2	2.5

Tableau 2. 20. Données de I-V pour une température $T_c = 35\text{C}^0$ et une insolation $G = 800\text{ w/m}^2$.

V	I
14.2	93.72
15.7	103.3
17.2	113
18.7	122.67
20.2	132.1
21.7	140.39
23.2	147.23
24.2	145.92
26.1	141.72
27.7	119.66
29.2	73

Tableau 2. 21. Données de P-V pour une température $T_c = 35\text{C}^0$ et une insolation $G = 800\text{ w/m}^2$.

Les tableaux 2.22 et 2.23, sont les résultats de la MNCS, donc ils contiennent les coefficients des polynômes d'interpolation, pour le courant et la puissance, respective.

a	b	c	d
6.6	-0.0151	0	0.0008
6.58	-0.0098	0.0036	-0.001
6.57	-0.0059	-0.001	0.0003

6.56	-0.0068	0.0004	-0.0032
6.54	-0.0271	-0.014	0.0006
6.47	-0.0648	-0.0111	-0.0053
6.33	-0.1337	-0.0348	-0.0062
6.03	-0.2802	-0.0628	-0.0113
5.43	-0.5453	-0.1139	-0.0106
4.32	-0.9586	-0.1616	-0.0055
2.5	-1.4804	-0.1863	0.0414

Tableau 2. 22. Les coefficients du polynôme d'interpolation ($T_c = 35C^0$ et $G = 800 \text{ w/m}^2$).

a	b	c	d
93.72	6.3693	0	0.0095
103.3	6.4335	0.0428	-0.0144
113	6.4648	-0.022	0.006
122.67	6.4394	0.005	-0.0695
132.1	5.9857	-0.3075	0.0013
140.39	5.072	-0.3016	-0.14
147.23	3.2224	-0.9315	-0.1934
145.92	-0.8776	-1.8019	-0.3865
141.72	-8.8919	-3.541	-0.3843
119.66	-22.1086	-5.2701	-0.4869
73	-41.2055	-7.4611	1.658

Tableau 2. 23. Les coefficients du polynôme d'interpolation ($T_c = 35C^0$ et $G = 800 \text{ w/m}^2$).

$$I(V) = \begin{cases} 6.6 & 0 \leq V < 14.2 \\ 6.6 - 0.0151(V - 14.2) + 0.0008(V - 14.2)^3 & 14.2 \leq V < 15.7 \\ 6.58 - 0.0098(V - 15.7) + 0.0036(V - 15.7)^2 - 0.001(V - 15.7)^3 & 15.7 \leq V < 17.2 \\ 6.57 - 0.0059(V - 17.2) - 0.001(V - 17.2)^2 + 0.0003(V - 17.2)^3 & 17.2 \leq V < 18.7 \\ 6.56 - 0.0068(V - 18.7) + 0.0004(V - 18.7)^2 - 0.0032(V - 18.7)^3 & 18.7 \leq V < 20.2 \\ 6.54 - 0.0271(V - 20.2) - 0.014(V - 20.2)^2 + 0.0006(V - 20.2)^3 & 20.2 \leq V < 21.7 \\ 6.47 - 0.0648(V - 21.7) - 0.0111(V - 21.7)^2 - 0.0053(V - 21.7)^3 & 21.7 \leq V < 23.2 \\ 6.33 - 0.1337(V - 23.2) - 0.0348(V - 23.2)^2 - 0.0062(V - 23.2)^3 & 23.2 \leq V < 24.7 \\ 6.03 - 0.2802(V - 24.7) - 0.0628(V - 24.7)^2 - 0.0113(V - 24.7)^3 & 24.7 \leq V < 26.2 \\ 5.43 - 0.5453(V - 26.2) - 0.1139(V - 26.2)^2 - 0.0106(V - 26.2)^3 & 26.2 \leq V < 27.7 \\ 4.32 - 0.9586(V - 27.7) - 0.1616(V - 27.7)^2 - 0.0055(V - 27.7)^3 & 27.7 \leq V < 29.2 \\ 2.5 - 1.4804(V - 29.2) - 0.1863(V - 29.2)^2 + 0.0414(V - 29.2)^3 & 29.2 \leq V < 30.7 \end{cases} \quad (2.38)$$

$$P(V) = \begin{cases} 6.6V & 0 \leq V < 14.2 \\ 93.72 + 6.3693(V - 14.2) + 0.0095(V - 14.2)^3 & 14.2 \leq V < 15.7 \\ 103.3 + 6.4335(V - 15.7) + 0.0428(V - 15.7)^2 - 0.0144(V - 15.7)^3 & 15.7 \leq V < 17.2 \\ 113 + 6.4648(V - 17.2) - 0.022(V - 17.2)^2 + 0.006(V - 17.2)^3 & 17.2 \leq V < 18.7 \\ 122.67 + 6.4394(V - 18.7) + 0.005(V - 18.7)^2 - 0.0695(V - 18.7)^3 & 18.7 \leq V < 20.2 \\ 132.1 + 5.9857(V - 20.2) - 0.3075(V - 20.2)^2 + 0.0013(V - 20.2)^3 & 20.2 \leq V < 21.7 \\ 140.39 + 5.072(V - 21.7) - 0.3016(V - 21.7)^2 - 0.14(V - 21.7)^3 & 21.7 \leq V < 23.2 \\ 147.23 + 3.2224(V - 23.2) - 0.9315(V - 23.2)^2 - 0.1934(V - 23.2)^3 & 23.2 \leq V < 24.7 \\ 145.92 - 0.8776(V - 24.7) - 1.8019(V - 24.7)^2 - 0.3865(V - 24.7)^3 & 24.7 \leq V < 26.2 \\ 141.72 - 8.8919(V - 26.2) - 3.541(V - 26.2)^2 - 0.3843(V - 26.2)^3 & 26.2 \leq V < 27.7 \\ 119.66 - 22.1086(V - 27.7) - 5.2701(V - 27.7)^2 - 0.4869(V - 27.7)^3 & 27.7 \leq V < 29.2 \\ 73 - 41.2055(V - 29.2) - 7.4611(V - 29.2)^2 + 1.658(V - 29.2)^3 & 29.2 \leq V < 30.7 \end{cases} \quad (2.39)$$

Les équations 2.38 et 2.39, sont les modèles par la MNCS des caractéristiques I – V et P – V respectivement, du panneau PV ($T_c = 35 \text{ C}^0$ et $G = 800 \text{ w/m}^2$).

Les tableaux 2.24 et 2.25, déterminent les caractéristiques I – V et P – V, respectivement, donnée par le modèle Lambert (X) et la modélisation par la MNCS (Y). Dont le but, de réaliser un test de qualité.

V	X	Y
3.02	6.5934	6.6
6.27	6.5934	6.6
12.09	6.5928	6.6
21.85	6.4665	6.45
27.36	4.6333	4.6276
28.87	2.9747	2.9684

29.96	1.2814	1.2854
30.7	0	0
<i>moyenne:</i>	4.3919	4.3914

Tableau 2. 24. Les données de la caractéristique I – V ($T_c = 35C^0$ et $G = 800 w/m^2$).

V	X	Y
3.02	19.912	19.932
6.27	41.3406	41.382
12.09	79.7069	79.596
21.85	141.293	141.1435
27.36	126.767	126.0407
28.87	85.8795	85.7988
29.96	38.3907	38.1021
30.7	0	0
<i>moyenne:</i>	66.6612	66.4993

Tableau 2. 25. Les données de la caractéristique P – V ($T_c = 35C^0$ et $G = 800 w/m^2$).

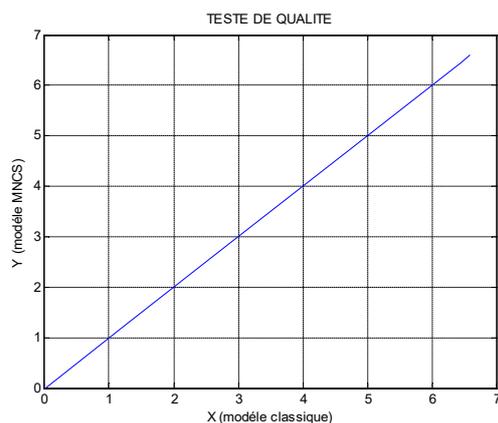


Figure 2. 11. Distribution des données du tableau 2.24.

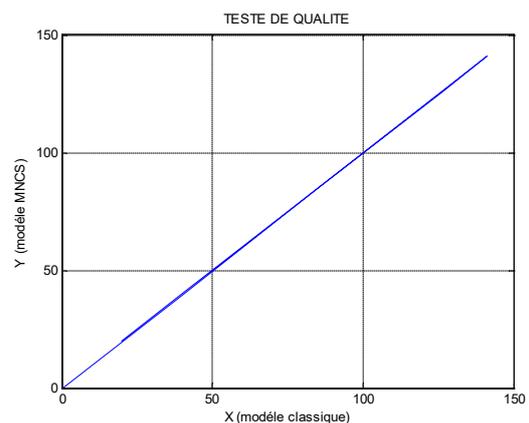


Figure 2. 12. Distribution des données du tableau 2.25.

Les figures 2.11 et 2.12, montrent la distribution des données des tableaux 2.24 et 2.25, respectivement. Nous constatons que les deux figures représentent une droite (figure 2.12 contient deux droite superposés).

Pour le tableau 2.24:

$$S_{XX} = 49.8718$$

$$S_{YY} = 49.8839$$

$$S_{XY} = 49.3229$$

$$R^2 = \frac{49.3229^2}{49.8839 \cdot 49.8718} = 0.9778$$

Pour le tableau 2.25:

$$S_{XX} = 17757.4750$$

$$S_{YY} = 17788.8792$$

$$S_{XY} = 17740.0689$$

$$R^2 = \frac{17740.0689^2}{17788.8792 \cdot 17757.4750} = 0.9962$$

Nous remarquons, que $R^2 \rightarrow 1$. Donc avec ce résultat et les constatations faites à partir des figures 2.11 et 2.12. Nous pouvons dire, que la modélisation par la MNCS, du panneau KC200GT pour une température $T_c = 35C^0$ et une insolation $G = 800 \text{ w/m}^2$, est de bonne qualité.

2.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié le panneau solaire PV (KC200GT), modélisé par un modèle à une seule diode sans résistance parallèle. Dans le but de construire un modèle mathématique qui décrit les *caractéristiques* $I - V$ et $P - V$ du panneau PV. Pour cela, nous avons utilisé la méthode du naturelle cubique spline interpolation (MNCS). Les résultats obtenus par cette dernière sont acceptables.

Chapitre 3 : Simulation et interprétation des résultats

3.1 Introduction

Les logiciels de simulations sont des outils puissants pour tester et évaluer l'exécution théorique des systèmes. Les conditions d'exécution du dispositif à tester peuvent être facilement contrôlables.

La simulation nous permet de passer de la conception du système théorique à la réalisation pratique avec plus d'assurance car les changements lors de la conception peuvent être faits facilement dans un système simulé, ceci nous permet d'expérimenter un ensemble large de variations et de choisir enfin la solution optimale.

Nous présenterons dans ce chapitre les résultats obtenus lors de notre étude et nous analyserons les données recueillies puis nous comparerons les résultats de simulation obtenus par les deux méthodes, Lambert et la méthode mathématique MNCS pour un panneau solaire KC200GT sous MATLAB. [18]

3.2 Modélisation du panneau PV KC200GT par le modèle Lambert

Le modèle Lambert, d'un panneau PV est représenté par l'équation 2.26.

$$I = \frac{-qV + \left(-LambertW \left(\frac{qR_s I_0 \exp \left(\frac{q(V + R_s I_L + R_s I_0)}{\gamma k T_c} \right)}{\gamma k T_c} \right) + \left(\frac{q(V + R_s I_L + R_s I_0)}{\gamma k T_c} \right) \right) \gamma k T_c}{qR_s}$$

Dans cette partie, nous allons tracer les caractéristiques $I - V$ et $P - V$ du panneau KC200GT à différentes température et insolation. Une fois ces caractéristiques tracées, nous les comparons avec celle donnée par le constructeur.

3.2.1 Influence de l'éclairement

a) les courbes de la caractéristique I – V

Les courbes ci -dessous reprennent les caractéristiques $I = f(V)$ pour le modèle Lambert du panneau KC200GT. Dans la simulation, sous MATLAB nous avons fixé la température $T = 25\text{ C}^\circ$, et varié l'irradiation $G = 200, 400, 600, 800$ et 1000 W/m^2 .

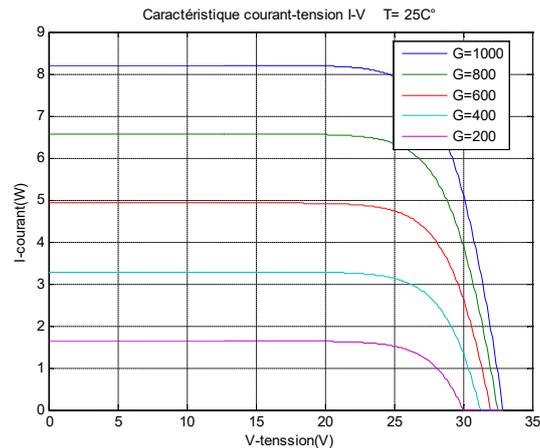


Figure 3. 1. Caractéristiques I – V du panneau PV KC200GT pour $T = 25\text{ C}^\circ$, et $G = 200, 400, 600, 800$ et 1000 W/m^2 pour le modèle Lambert.

b) les courbes de la caractéristique P – V

Les courbes ci -dessous reprennent les caractéristiques $P = f(V)$ pour une température fixe $T = 25\text{ C}^\circ$ et une irradiation variable $G = 200, 400, 600, 800$ et 1000 W/m^2 , pour le modèle Lambert du panneau KC200GT.

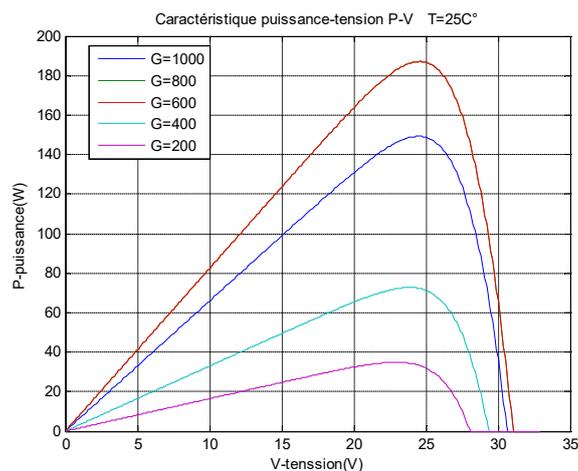


Figure 3. 2. Caractéristiques I – V du panneau PV KC200GT pour $T = 25\text{ C}^\circ$, et $G = 200, 400, 600, 800$ et 1000 W/m^2 pour le modèle Lambert.

Nous constatons, que la valeur du courant de court-circuit (I_{SC}) est proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert (V_{OC}) ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste presque identique même à faible éclairement G . En plus, les points de puissance maximale se situent à peu près à la même tension.

3.2.2 Influence de la température

a) les courbes de la caractéristique I – V

Les courbes ci -dessous reprennent les caractéristiques $I = f(V)$ pour le modèle Lambert du panneau KC200GT. Dans la simulation sous MATLAB nous avons fixé, l'irradiation $G = 1000 \text{ W/m}^2$, et varier la température à $T = 25, 50$ et 75 C° .

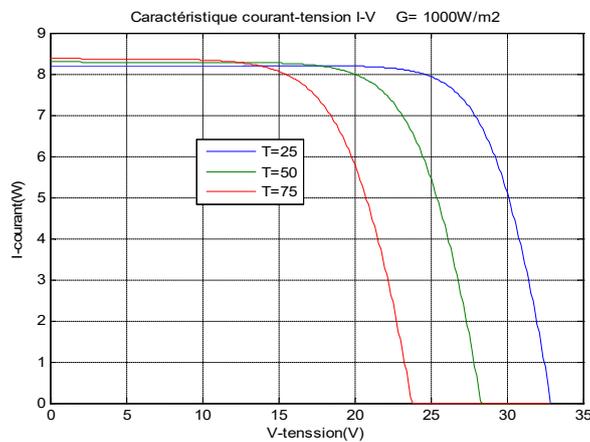


Figure 3. 3. La caractéristique P – V du panneau PV KC200GT pour $G = 1000 \text{ W/m}^2$, et $T = 25, 50$ et 75 C° pour le modèle Lambert.

b) les courbes de la caractéristique P – V

Les courbes ci -dessous reprennent les caractéristiques $P = f(V)$ pour le modèle Lambert. Dans la simulation, sous MATLAB nous avons fixé, l'irradiation $G = 1000 \text{ W/m}^2$, et varier la température à $T = 25, 50$ et 75 C° .

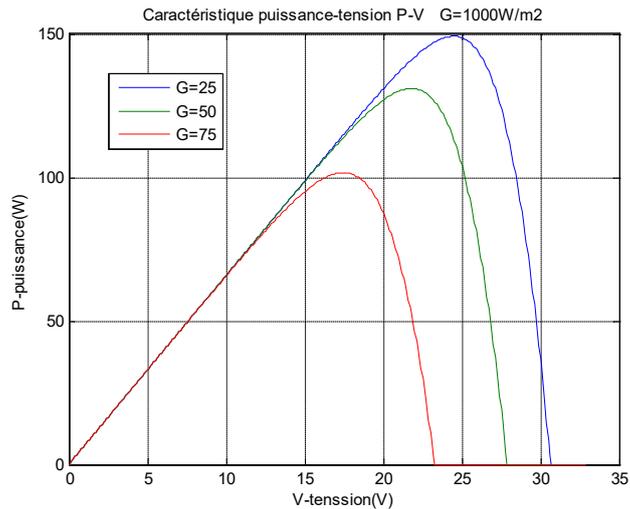


Figure 3. 4. La caractéristique P – V du panneau PV KC200GT pour $G = 1000 \text{ W/m}^2$, et $T = 25, 50$ et 75 C° pour le modèle Lambert.

Nous constatons, que la valeur de la tension en circuit ouvert (V_{OC}) est proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, le courant de court-circuit (I_{SC}) ne varie pas dans les mêmes proportions, mais reste presque identique même à faible éclairement G .

3.2.3 Comparaison entre le modèle Lambert et les caractéristiques données par le constructeur

Les courbes ci -dessous reprennent les caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$. Dans la simulation, sous MATLAB nous avons fixé la température $T = 25 \text{ C}$, et varié l'irradiation $G = 200, 400, 600, 800$ et 1000 W/m^2 .

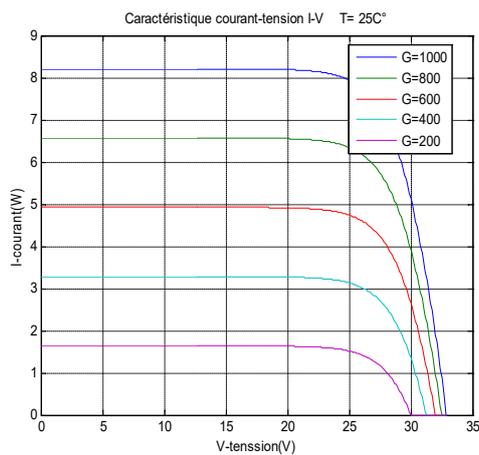


Figure 3. 5. La caractéristiques I – V du panneau PV KC200GT pour $T = 25\text{C}^0$ et $G = 200, 400, 600, 800, 1000 \text{ w/m}^2$ pour le modèle

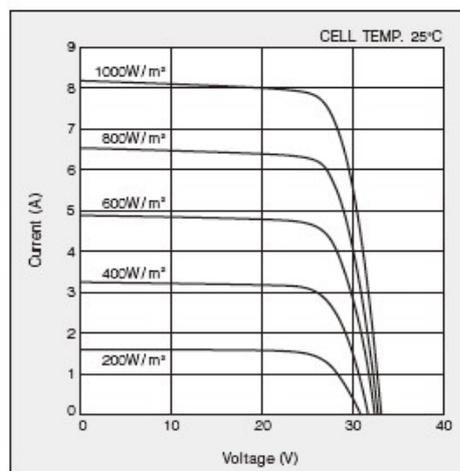


Figure 3. 6. La caractéristiques I – V du panneau PV KC200GT pour $T = 25\text{C}^0$ et $G = 200, 400, 600, 800, 1000 \text{ w/m}^2$ donnés par le

Les figures 3.5 et 3.6, sont les courbes caractéristiques courant-tension, du modèle mathématique et celle donné par le constructeur.

Les courbes ci -dessous reprennent les caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$. Dans la simulation, sous MATLAB nous avons fixé l'irradiation $G = 1000 \text{ W/m}^2$, et varier la température $T = 25, 50$ et 75 C° .

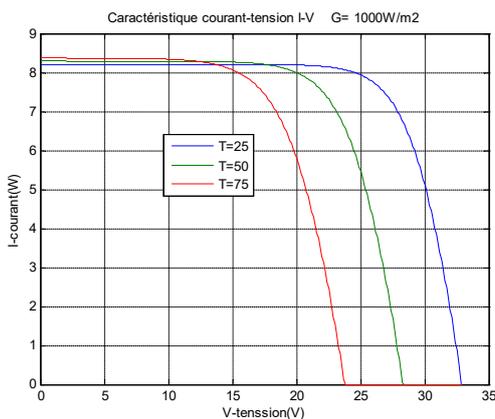


Figure 3. 7. La caractéristique $I - V$ du panneau PV KC200GT pour $T = 25, 50$ et 75 C° et $G = 1000 \text{ W/m}^2$.

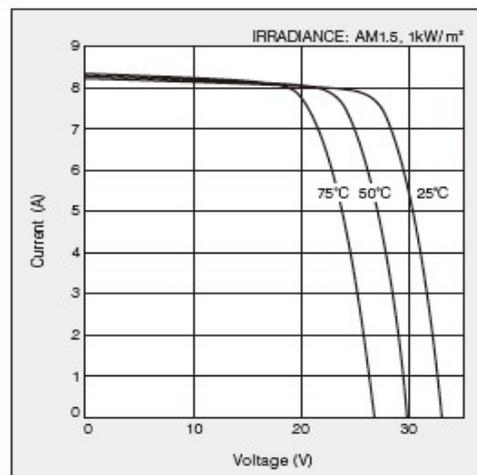


Figure 3. 8. La caractéristique $I - V$ du panneau PV KC200GT pour $T = 25, 50$ et 75 C° et $G = 1000 \text{ W/m}^2$.

Les figures 3.7 et 3.8, sont les courbes caractéristiques puissance-tension, du modèle mathématique et celle donné par le constructeur.

La comparaison des résultats donnés par les deux modèles montre la super position des courbes pour les deux modèles, ce qui nous permet de conclure la bonne approximation de notre modèle par la méthode Lambert.

3.3 Modélisation du panneau PV KC200GT par la méthode MNCS

Dans cette partie, nous allons tracer les caractéristiques $I - V$ et $P - V$ du panneau KC200GT, Pour les quatre cas étudié dans le chapitre deux. Une fois ces caractéristiques tracées, nous les comparons avec celle de la modélisation classique.

Les courbes ci -dessous reprennent les caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ pour la MNCS. Dans la simulation, sous MATLAB nous avons fixé l'irradiation $G = 1000 \text{ W/m}^2$, et une température $T = 25\text{C}^\circ$.

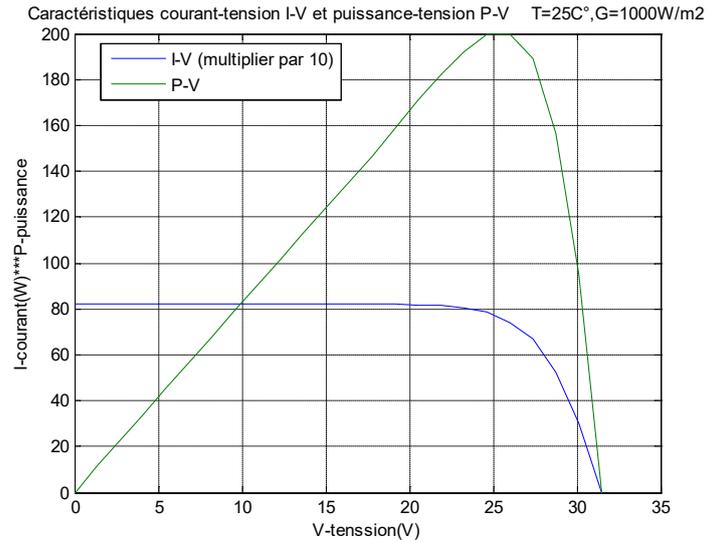


Figure 3. 9. La caractéristiques I – V et P – V du panneau PV KC200GT pour T = 25C° et G = 1000 W/m² pour la MNCS.

Les courbes ci -dessous reprennent les caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ pour la MNCS. Dans la simulation, sous MATLAB nous avons fixé l’irradiation $G = 800 \text{ W/m}^2$, et une température $T = 25\text{C}^\circ$.

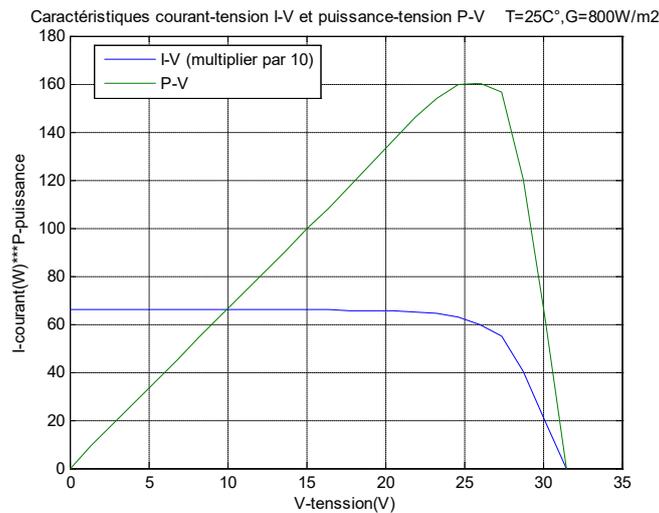


Figure 3. 10. La caractéristique I – V et P – V du panneau PV KC200GT pour T = 25C° et G = 800 W/m² pour la MNCS.

Les courbes ci -dessous reprennent les caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ pour la MNCS. Dans la simulation, sous MATLAB nous avons fixé l’irradiation $G = 1000 \text{ W/m}^2$, et une température $T = 35\text{C}^\circ$.

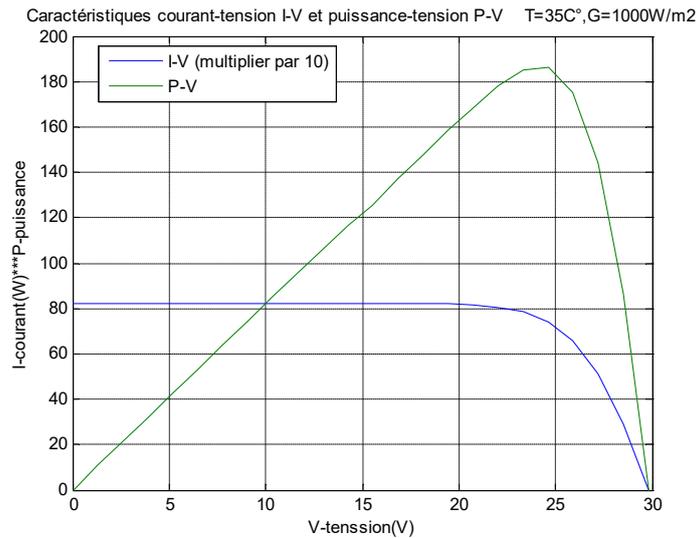


Figure 3. 11. La caractéristiques I – V et P – V du panneau PV KC200GT pour T = 35C° et G = 1000 W/m² pour la MNCS.

Les courbes ci -dessous reprennent les caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ pour la MNCS. Dans la simulation, sous MATLAB nous avons fixé l’irradiation $G = 800 \text{ W/m}^2$, et une température $T = 35\text{C}^\circ$.

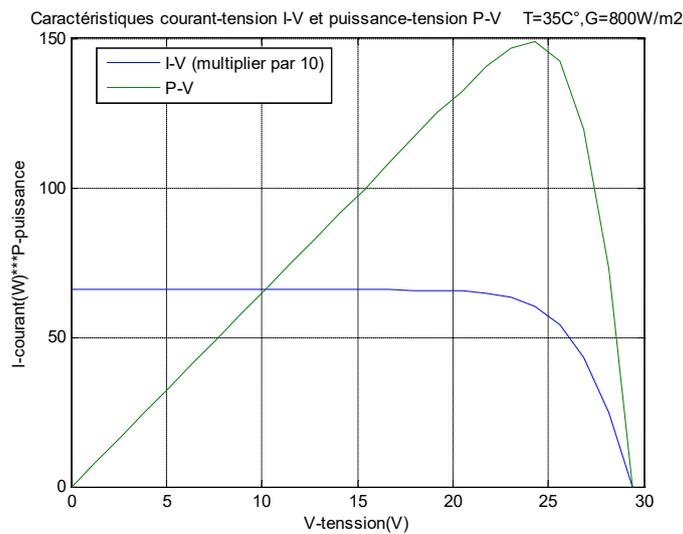


Figure 3. 12. La caractéristique I – V et P – V du panneau PV KC200GT pour T = 35C° et G = 800 W/m² pour la MNCS.

- **Comparaison entre le modèle classique et le modèle MNCS**

Les courbes ci -dessous reprennent les caractéristiques $I = f(V)$ et $I = f(V)$ pour les deux modèles. Dans la simulation, sous MATLAB nous avons fixé l’irradiation $G = 1000 \text{ W/m}^2$, et une température $T = 25\text{C}^\circ$.

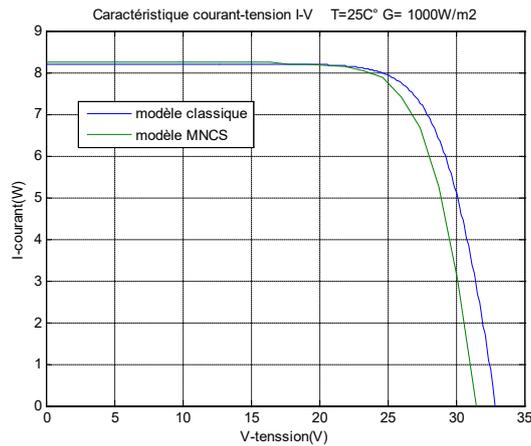


Figure 3. 13. La caractéristique I – V du panneau PV KC200GT pour $T = 25^{\circ}$ et $G = 1000 \text{ W/m}^2$ pour les deux modèles.

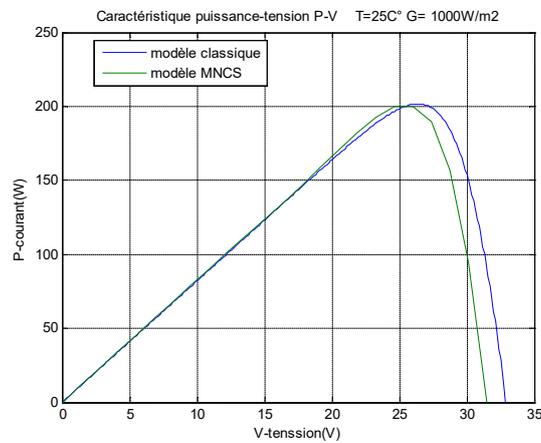


Figure 3. 14. La caractéristique P – V du panneau PV KC200GT pour $T = 25^{\circ}$ et $G = 1000 \text{ W/m}^2$ pour les deux modèles.

Les courbes ci -dessous reprennent les caractéristiques $I = f(V)$ et $I = f(V)$ pour les deux modèles. Dans la simulation, sous MATLAB nous avons fixé l’irradiation $G = 800 \text{ W/m}^2$, et une température $T = 25^{\circ}$.

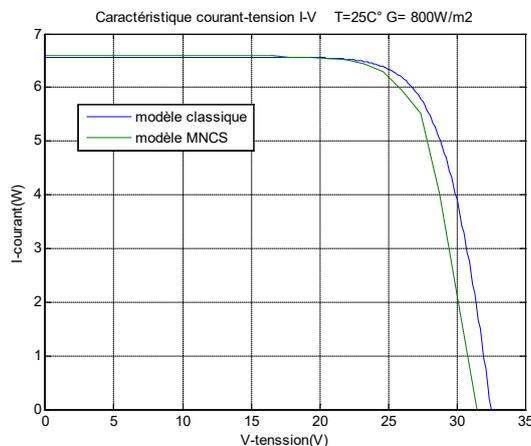


Figure 3. 15. La caractéristique I – V du panneau PV KC200GT pour $T = 25^{\circ}$ et $G = 800 \text{ W/m}^2$ pour les deux modèles.

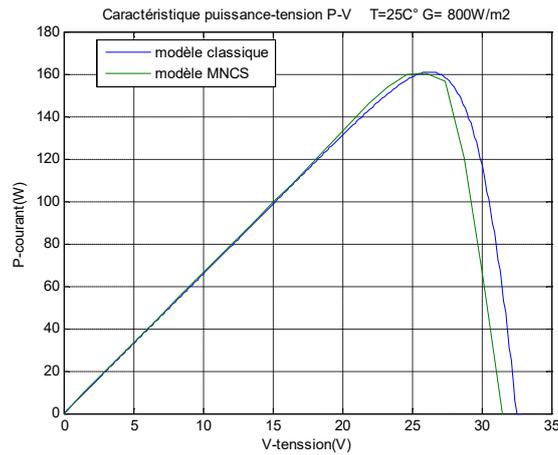


Figure 3. 16. La caractéristique P – V du panneau PV KC200GT pour $T = 25^{\circ}\text{C}$ et $G = 800 \text{ W/m}^2$ pour les deux modèles.

Les courbes ci -dessous reprennent les caractéristiques $I = f(V)$ et $I = f(V)$ pour les deux modèles. Dans la simulation, sous MATLAB nous avons fixé l’irradiation $G = 1000 \text{ W/m}^2$, et une température $T = 35^{\circ}\text{C}$.

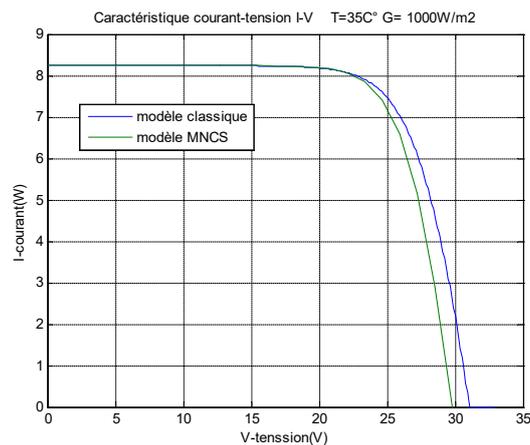


Figure 3. 17. La caractéristique I – V du panneau PV KC200GT pour $T = 35^{\circ}\text{C}$ et $G = 1000 \text{ W/m}^2$ pour les deux modèles.

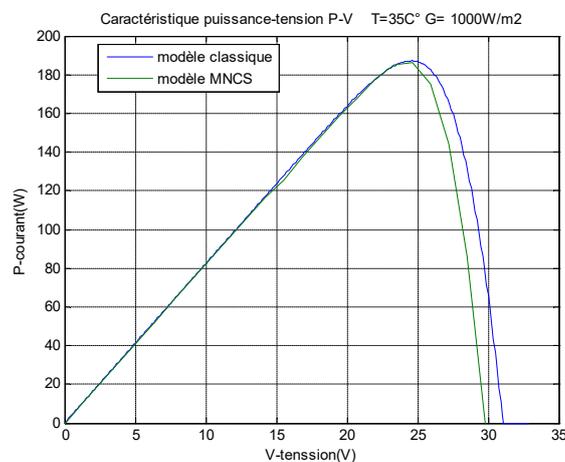


Figure 3. 18. La caractéristique P – V du panneau PV KC200GT pour $T = 35^{\circ}\text{C}$ et $G = 1000 \text{ W/m}^2$ pour les deux modèles.

Les courbes ci-dessous reprennent les caractéristiques $I = f(V)$ et $P = f(V)$ pour les deux modèles. Dans la simulation, sous MATLAB nous avons fixé l'irradiation $G = 800 \text{ W/m}^2$, et une température $T = 35^\circ\text{C}$.

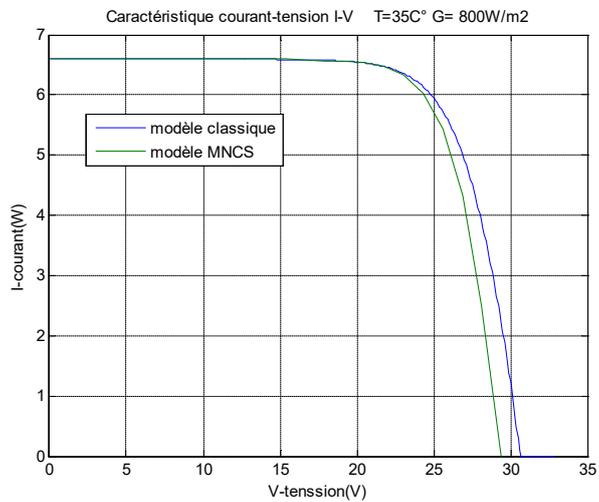


Figure 3. 19. La caractéristique $I - V$ du panneau PV KC200GT pour $T = 35^\circ\text{C}$ et $G = 800 \text{ W/m}^2$ pour les deux modèles.

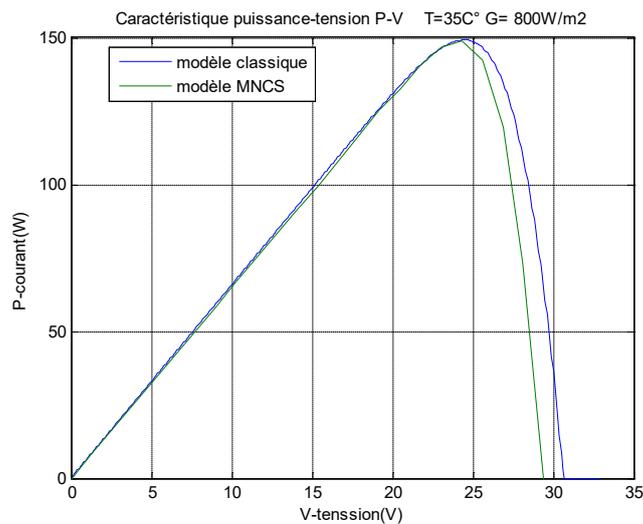


Figure 3. 20. La caractéristique $P - V$ du panneau PV KC200GT pour $T = 35^\circ\text{C}$ et $G = 800 \text{ W/m}^2$ pour les deux modèles.

En observons les graphes ci-dessus. Nous remarquerons que, les courbes obtenus à partir de la modélisation par la MNCS, ne sont pas superposés, avec celles des courbes du modèle classique. Mais au moins ces modèles sont de bonne qualité.

3.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une simulation du panneau PV KC200GT par deux méthodes. A sa voir la simulation du modèle classique, et celle du la MNCS.

La comparaison des résultats donnés par les deux méthodes montre la super position des courbes pour les deux méthodes. Ces résultats nous permet d'entamer l'implémentation sur cible FPGA.

Chapitre 4 : Implémentation un modèle mathématique MSCN sur FPGA

4.1 Introduction

Considéré comme l'un des meilleurs outils offerts sur le marché, le circuit FPGA (Field Programmable Gate Array) de Xilinx (voir annexe) offre une panoplie de composants, ainsi qu'un système de développement ISE (Integrated Software Engineering) offrant d'énormes possibilités de développement (synthèse, simulation et implémentation automatique).

Dans ce chapitre, il sera question de simulation et implémentation de l'architecture proposée. [18]

4.2 Étapes de conception

La méthodologie de base pour la conception sur circuit FPGA de Xilinx se décompose en quatre étapes:

- Description de l'architecture.
- Simulation fonctionnelle.
- Synthèse et implémentation.
- Simulation temporelle et vérification.

L'architecture que nous avons réalisée a été conçue dans l'environnement ISE 7.2 de Xilinx. Le processus d'implémentation convoite certaines phases de vérification. En premier lieu, l'architecture doit être décrite en langage VHDL (Very High Description Language). Après la description VHDL de l'architecture et sa compilation, une simulation fonctionnelle est introduite par le simulateur (ISE simulator), dont les résultats figurent sous forme de

chronogramme. Une fois que la simulation fonctionnelle est validée, une phase de synthèse va permettre de donner un rapport bien détaillé sur les ressources du circuit FPGA consommées, et sur la fréquence maximale de fonctionnement. Finalement, une phase de placement et routage éclate schématiquement la surface consommée par l'architecture globale et configure les routages d'interconnexion entre les différents blocs des ressources du circuit FPGA. Dans la simulation temporelle, on vérifie si le circuit obtenu respecte les contraintes temporelles et utilise les délais des portes et les délais dans les interconnexions pour calculer la vitesse maximale. La figure 4.1 regroupe toutes les étapes d'une conception sur circuit FPGA. [18]

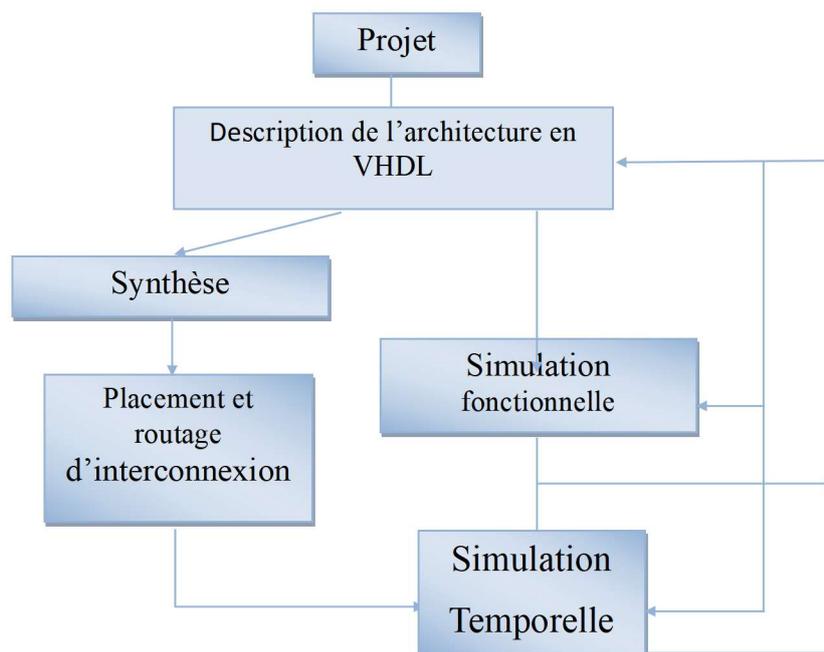


Figure 4. 1. Schéma des étapes de conception.

4.3 Description de l'architecture globale

L'architecture que nous avons proposée est composée de deux blocs définis comme suit:

- Bloc concaténation.
- Bloc générateur des donnés.

L'architecture globale est montrée par la figure 4.2:

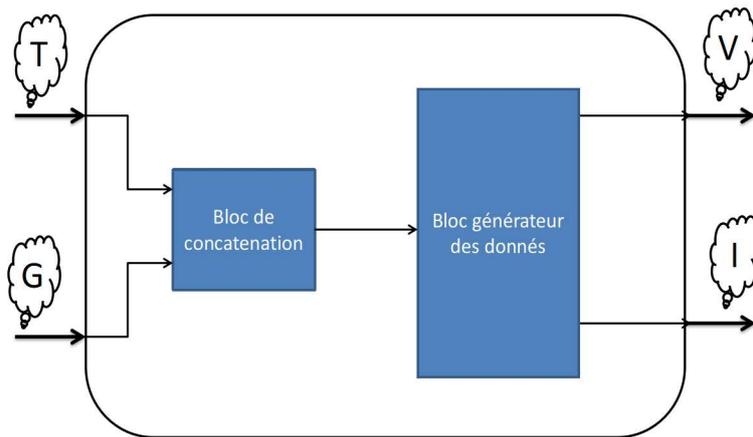


Figure 4. 2. Architecture globale.

4.3.1 Bloc concaténation

Ce bloc est constitué de:

- Décodeur 1 ;
- Décodeur 2 ;
- Compteur ;
- Démultiplexeur (Dé mux).

Les blocs décodeurs 1 et 2 consiste, dans un premier temps à attribuer un code pour T(trame de 9 bits) et G(trame de 10 bits).

<i>T</i>	<i>dec1</i>	<i>G</i>	<i>dec2</i>
25	0	1000	0
35	1	800	1

Le résultat obtenu sera appliqué comme des lignes de sélections du démultiplexeur (1-4).

<i>condition</i>	<i>sortie démux</i>
00	<i>E1</i>
01	<i>E2</i>
10	<i>E3</i>
11	<i>E4</i>

Nous attribuerons la valeur obtenue par le compteur à la sortie du démultiplexeur selon les lignes de sélections.

L'architecture de ce bloc est illustrée dans la figure 4. 3 :

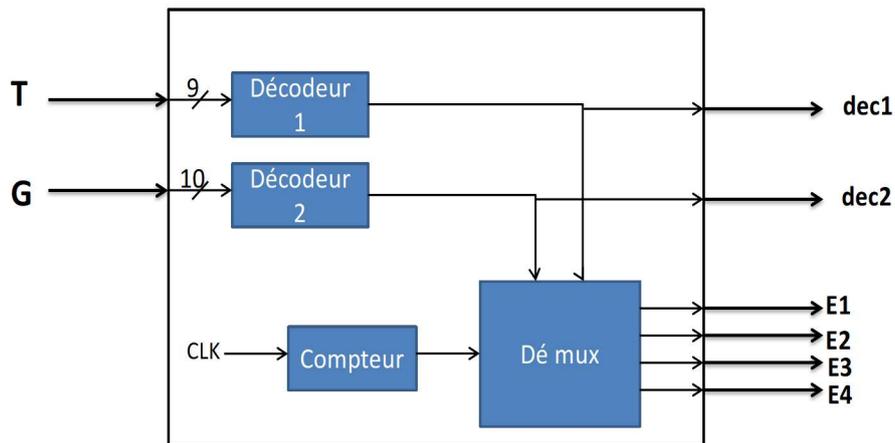


Figure 4. 3. Architecture du Bloc concaténation.

4.3.2 Bloc générateur des données

Ce bloc est constitué de:

- Cas1 ;
- Cas 2 ;
- Cas 3 ;
- Cas 4 ;
- Multiplexeur 1 (Mux 1) ;
- Multiplexeur 2 (Mux 2).

L'opération de génération des données est réalisée par l'intermédiaire des blocs illustrés sur la figure 4.4.

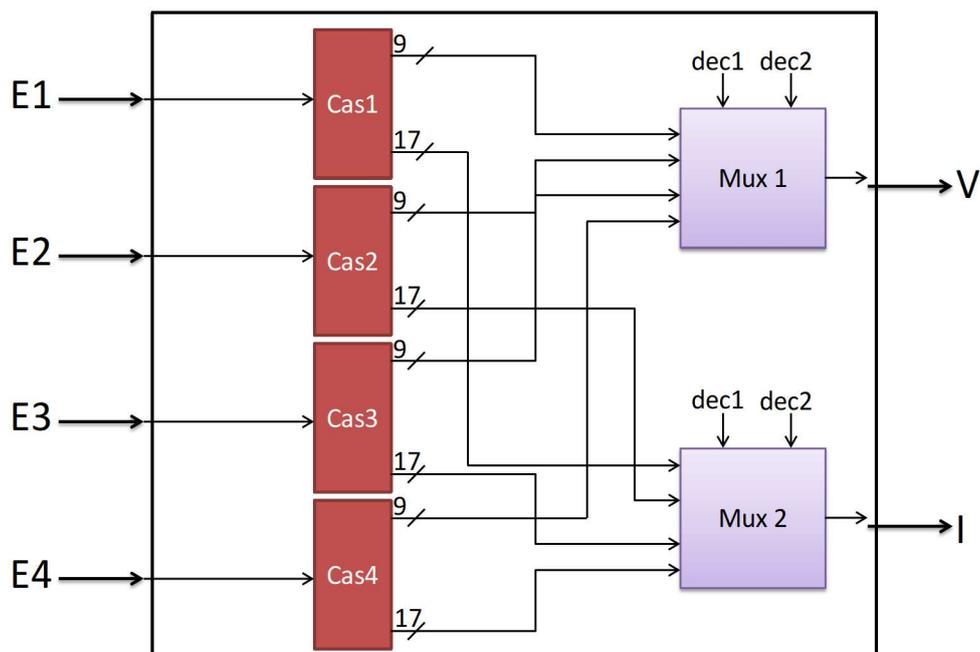


Figure 4. 4. Architecture du Bloc générateur des données.

Les blocs cas1, cas2, cas3 et cas4 sont responsables de générer les données suivant les entrées E1, E2, E3 et E4. Ces entrées sont choisies selon les lignes de sélection dec1 et dec2. L'architecture de ces blocs est illustrée dans la figure 4. 5 :

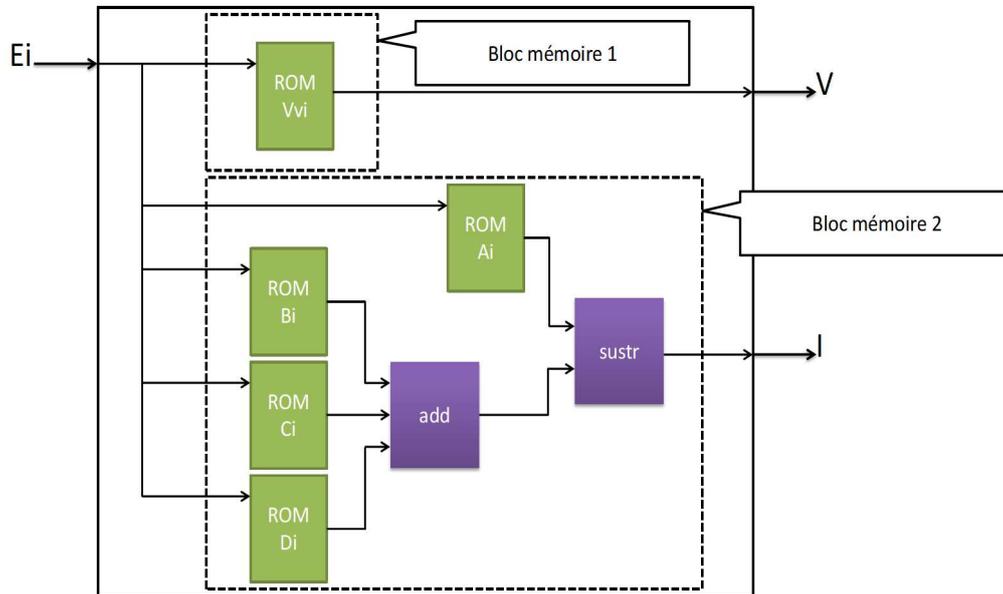


Figure 4. 5. Architecture des Blocs casi.

Le bloc mémoire 1 consiste, à charger dans la ROM V_{vi} de taille (9×16) toutes les valeurs de la tension à partir d'un fichier texte. Le bloc mémoire 1 consiste, à charger dans les ROM A_i , B_i , C_i et D_i de taille (17×16) les coefficients des polynômes d'interpolation de la MNCS pour les quatre cas.

L'entrée $E1$ nous permet d'adresser les cinq ROM à la fois. La sortie de la ROM V_{vi} nous donne les valeurs de V . Alors que pour les valeurs de I , nous devons sommer les sorties des ROM B_i , C_i et D_i dans additionneur la sortie de l'additionneur sera soustraire à celle de la ROM A_i . La sortie du soustracteur nous donne les valeurs de I .

4.4 Résultats de la simulation

Les chronogrammes de La figure 4.6 représentent les résultats de la simulation fonctionnelle du bloc Cas1.

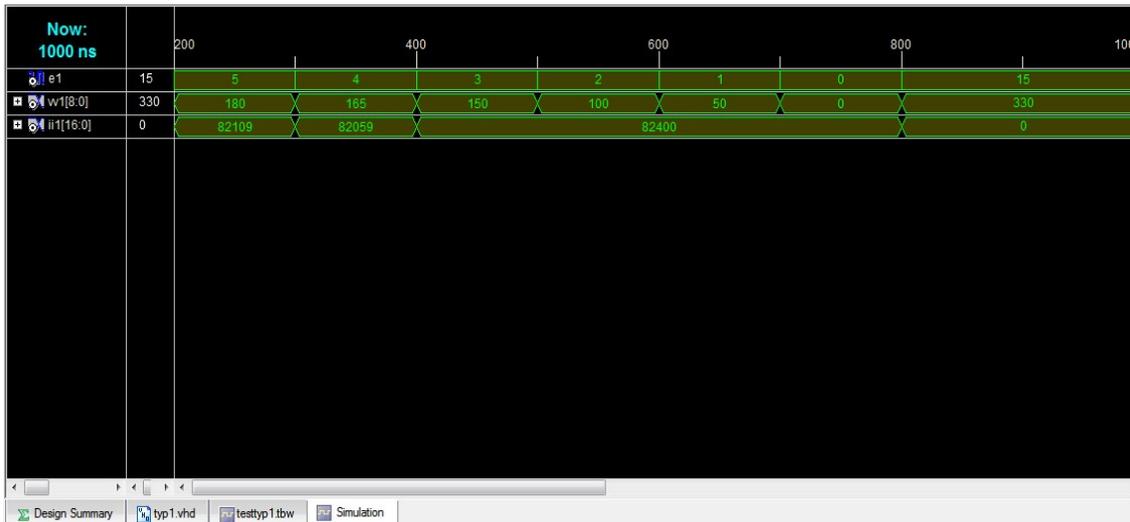


Figure 4.6. Chronogrammes bloc Cas1.

La figure 4.7 interprète l'allure de la courbure du résultat de la simulation du bloc Cas1 terrie à partir de la simulation sous le logiciel Xilinx.

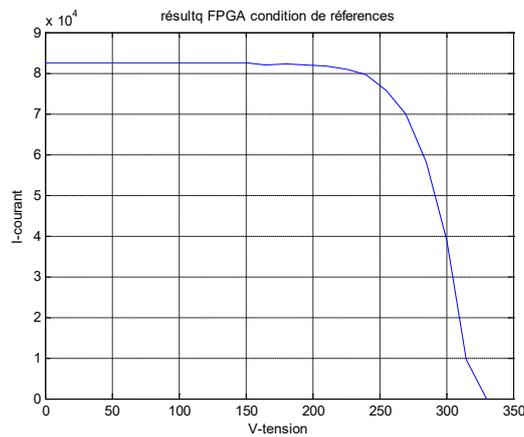


Figure 4.7. Résultats du bloc Cas1.

Les chronogrammes de La figure 4.8 représentent les résultats de la simulation fonctionnelle du bloc Cas2.

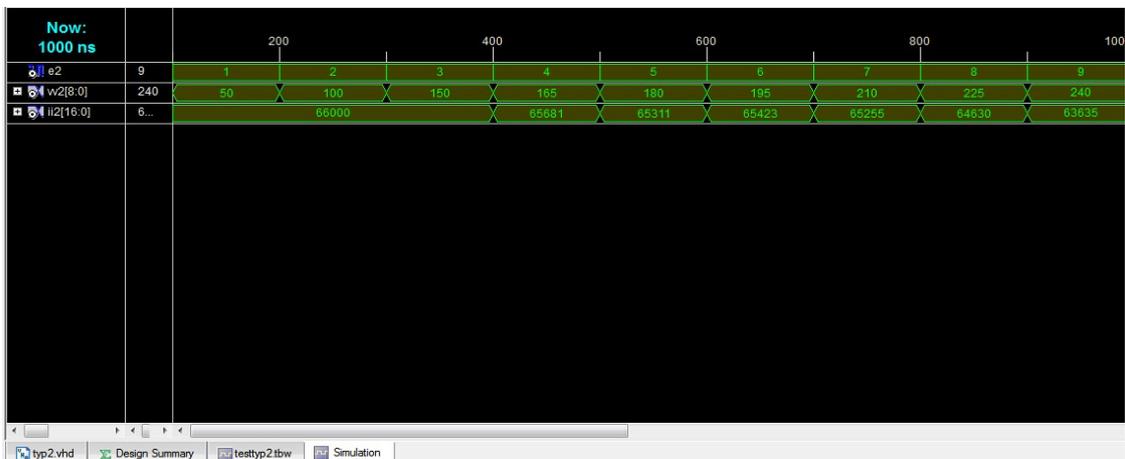


Figure 4.8. Chronogrammes bloc Cas2.

La figure 4.9 interprète l'allure de la courbure du résultat de la simulation du bloc Cas2 terrie à partir de la simulation sous le logiciel Xilinx.

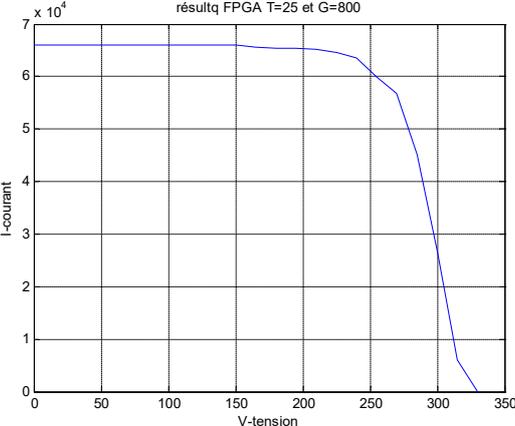


Figure 4.9. Résultats du bloc Cas2.

Les chronogrammes de La figure 4.10 représentent les résultats de la simulation fonctionnelle du bloc Cas3.

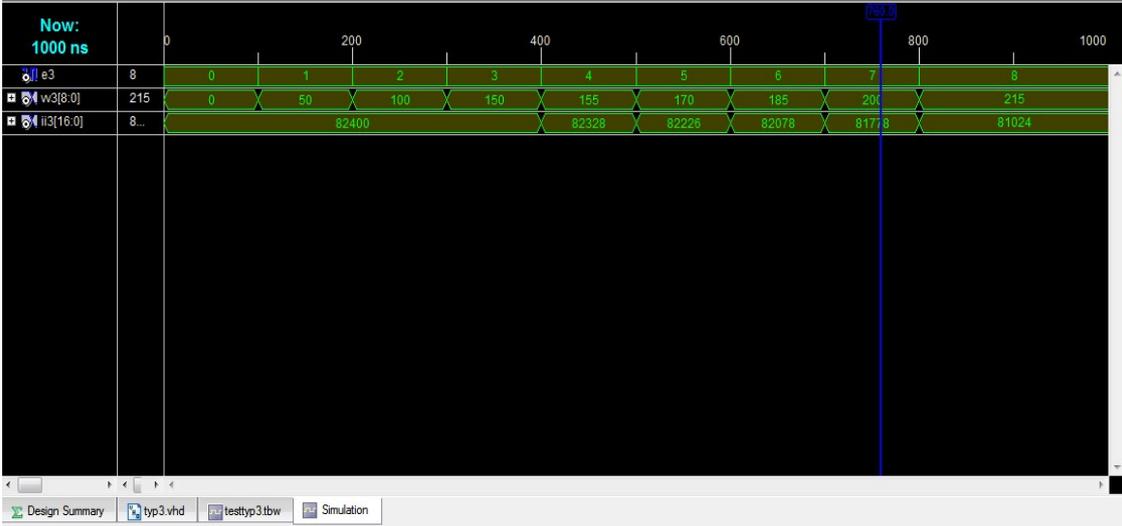


Figure4.10. Chronogrammes bloc Cas3.

La figure 4.11 interprète l'allure de la courbure du résultat de la simulation du bloc Cas3 terrie à partir de la simulation sous le logiciel Xilinx.

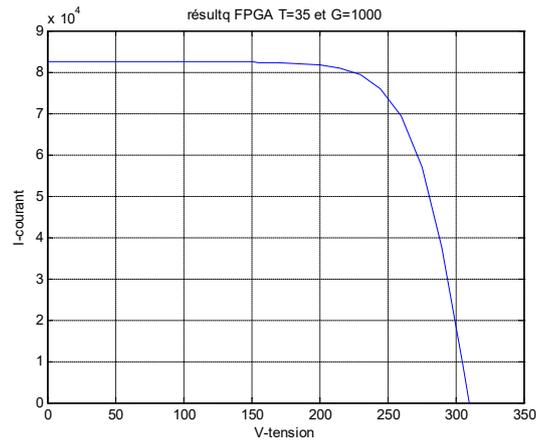


Figure 4.11. Résultats du bloc Cas3.

Les chronogrammes de La figure 4.12 représentent les résultats de la simulation fonctionnelle du bloc Cas4.

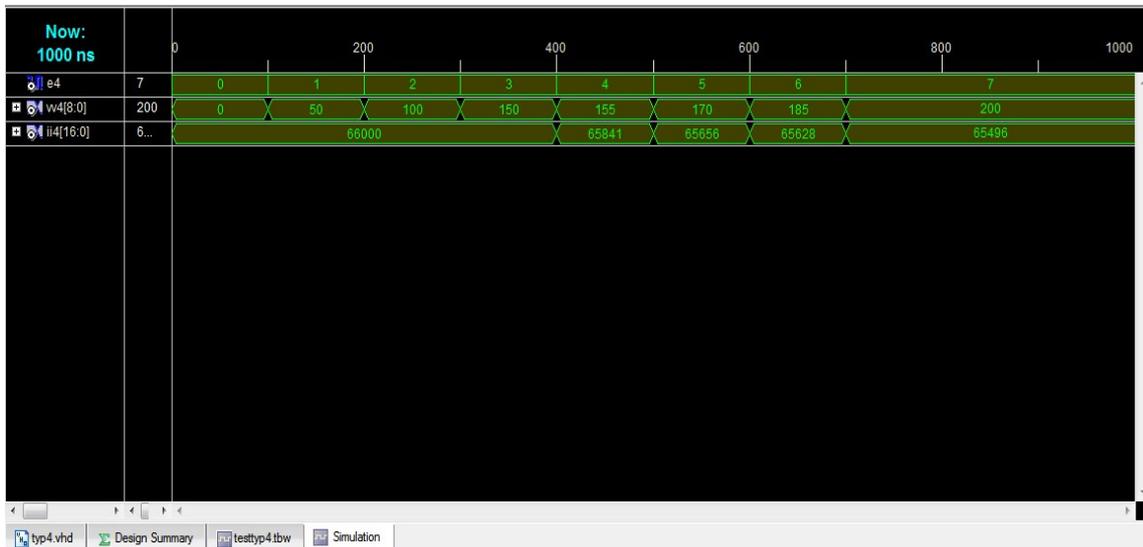


Figure4.12. Chronogrammes bloc Cas4.

La figure 4.13 interprète l'allure de la courbure du résultat de la simulation du bloc Cas4 terrie à partir de la simulation sous le logiciel Xilinx.

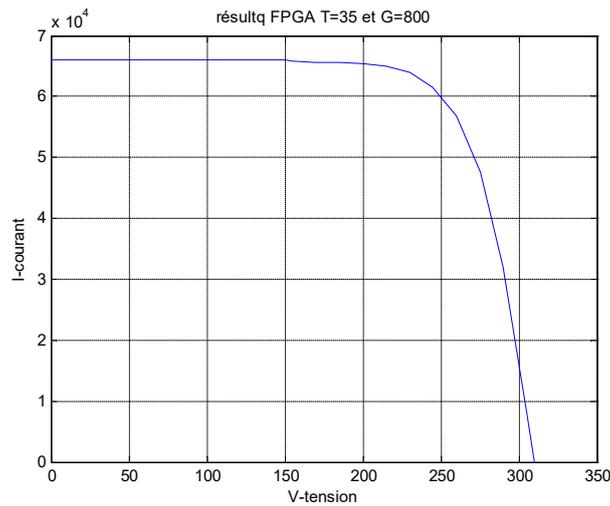


Figure 4.13. Résultats du bloc Cas4.

D’après les figures 4.7, 4.9, 4.11 et 4.13, nous remarquerons que les résultats obtenus sont plus ou moins similaire, à c’elles obtenus par la simulation par MATLAB. Nous constatons que l’intensité du courant et multiplier par 10^4 et la tension multiplier par 10.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la méthodologie de conception de notre architecture pour l’implémentation du modèle mathématique du panneau KC200GT. Nous avons également donné, les résultats de simulation suivant plusieurs étapes. Chacune d’entre elles utilise une architecture bien spécifique.

Conclusion générale

La technologie photovoltaïque est une technologie constituant une excellente alternative aux énergies renouvelable et n'affecte en rien l'environnement à l'inverse des autres énergies fossiles. Le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions. Les premières applications de ces cellules sont développées dans le domaine spatial (satellites, navettes,...). Elles remontent aux années soixante. Par la suite, elles sont introduites dans le domaine de la télécommunication (Téléphonie rurale, faisceaux de relais hertziens) et dans les sites isolés (le pompage de l'eau).

Dans ce mémoire nous nous sommes intéressés à une étude et modélisation d'un panneau solaire PV KC200GT par un modèle mathématique MNCS. La simulation sous MATLAB a été établie.

Nous nous sommes intéressés plus précisément au modèle à une seule diode, et en négligeant la résistance parallèle R_p pour des raisons de simplicité (modèle de la cellule photovoltaïque à une exponentielle). Pour reconstituer les caractéristiques courant – tension $I - V$ et puissance – tension $P - V$, nous avons utilisé la méthode classique dite de Lambert et la méthode MNCS.

L'estimation de la puissance fournie par le module solaire en fonction des conditions climatiques (insolation, température) sont testés en utilisant deux méthodes Lambert et MNCS. Pour faire une comparaison entre ces deux méthodes, nous nous sommes basés sur les caractéristiques d'un panneau KC200GT fournit par le constructeur. Les résultats obtenus sont simulable.

Nous remarquons que le modèle mathématique Lambert contient une exponentielle, ce qui rend l'implémentation sur circuit FPGA de cette approximation difficile. Par contre La

méthode MNCS nous a conduites à une implémentation facile et moins couteuse du panneau solaire.

L'architecture globale du modèle MNCS est composée de deux blocs. Bloc de concaténation, il nous permet de sélectionné le cas à modélisé et le bloc générateur des donnés, ce bloc est constitué principalement de mémoires (ROM), ces ROM sont regrouper dans deux bloc, le bloc mémoire 1 nous génère les valeurs de V , alors que le bloc mémoire 2 nous permis d'obtenir les valeurs de I suivant les coefficients des polynômes de l'interpolation par la MNCS.

1. Composants et les types de cellule

La cellule est l'unité de conversion la plus adaptée à l'effet photovoltaïque. Comme l'affirment les documents [5] et [4], les matériaux et la méthodologie utilisés pour la conception de ces cellules influent sur l'énergie récupérée. Il en résulte que de nombreuses solutions ont été développées et nous allons brièvement les présenter.

1.1. Silicium Monocristallin

La cellule de silicium monocristallin est historiquement la plus largement utilisée et commercialisée. La fabrication de cellules de silicium commence avec l'extraction du cristal de dioxyde de silicium. Ce matériel est désoxydé dans de grands fours, purifié et solidifié. Ce processus a atteint une pureté de 98 et 99 % ce qui permet un rendement énergétique fort (en effet, plus le revêtement de la cellule est pur, plus l'effet photovoltaïque est facilité). Le silicium est alors fusionné avec une petite quantité de dopant, normalement le bore qui est de type P puis coupé en fines tranches d'environ 300 μm . Après la coupe et le nettoyage des impuretés des tranches, des impuretés de type N sont introduites.

via un processus de diffusion contrôlée: les tranches de silicium sont exposées à des vapeurs de phosphore dans un four où la température varie de 800 $^{\circ}\text{C}$ à 1000 $^{\circ}\text{C}$.

1.2 Silicium poly cristallin

Les cellules en silicium poly cristallin sont moins coûteuses que celles en silicium monocristallin car les processus de préparation des cellules sont moins stricts. Leur efficacité est cependant plus faible.

Le processus de production est semblable à celui présenté précédemment dans le cas de la fabrication de cellule en silicium mais avec un contrôle moins rigoureux. Il en résulte que les

cellules obtenues sont moins coûteuses mais aussi moins efficaces (12.5% de rendement en moyenne).

Leur intérêt réside dans la multiplicité des formes sous laquelle le revêtement peut se présenter : lingots à découper, ruban ou fil à déposer,... Chaque technique permet de produire des cristaux ayant des caractéristiques spécifiques, y compris la taille, la morphologie et la concentration des impuretés.

1.3 Silicium amorphe

Les cellules de silicium amorphe diffèrent des cellules présentées précédemment puisque leur structure présente un haut degré de désordre dans la structure des atomes. L'utilisation de silicium amorphe pour les cellules solaires a montré de grands avantages à la fois au niveau des propriétés électriques et le processus de fabrication (processus simple, faiblement consommateur d'énergie, peu coûteux, possibilité de produire des cellules avec grands secteurs). Mais, même avec un coût réduit pour la production, l'utilisation du silicium amorphe a deux inconvénients : le premier est le rendement de conversion faible par rapport aux cellules de mono et poly cristallin de silicium. Le deuxième est le fait que les cellules sont affectées par un processus de dégradation dans les premiers mois d'opération, réduisant ainsi leur durabilité. En 1993, la production de cellules photovoltaïques a atteint un sommet à 60MWp, et le silicium demeure le matériau le plus utilisé. Toutefois, la recherche de matériaux alternatifs est intense et concentrée dans le domaine des films minces, comme le silicium amorphe. La technologie des cellules de films minces n'est pas encore maîtrisée mais pourrait s'avérer intéressante car elle utilise moins de matériau que ceux en structure cristalline et elle nécessite moins d'énergie dans le processus de fabrication.

2 Présentation des FPGA et conception sur ISE 7.2

2.1 Description d'un FPGA (Field Programmable Gate Array)

Un FPGA ou (réseaux logiques programmables) consiste en une matrice carrée de cellules configurables CLB (Configurables Logique Blocs) permettant de réaliser des fonctions combinatoires et des fonctions séquentielles. Tout autour de ces blocs logiques

configurables, nous trouvons des blocs d'entrées /sorties IOB (Input Output Blocs) dont le rôle est de gérer les entrées-sorties réalisant l'interface avec les modules extérieurs. La figure B.1 présente l'architecture générale d'un FPGA.

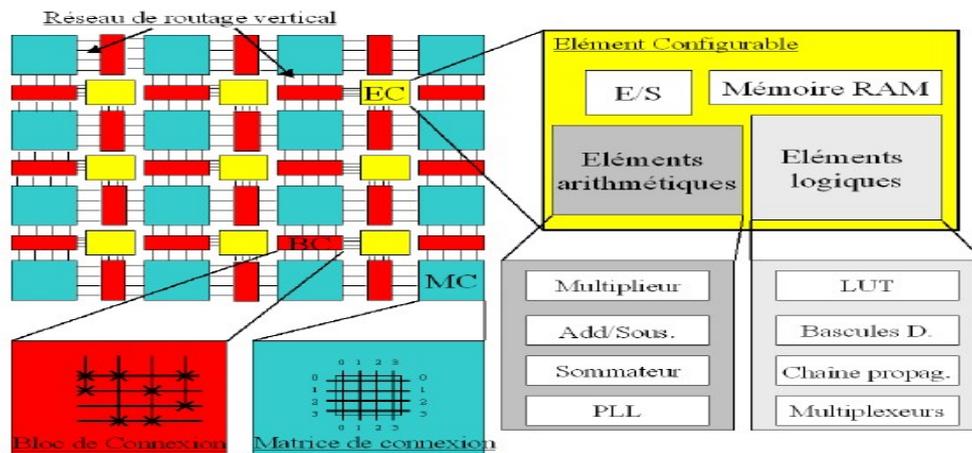
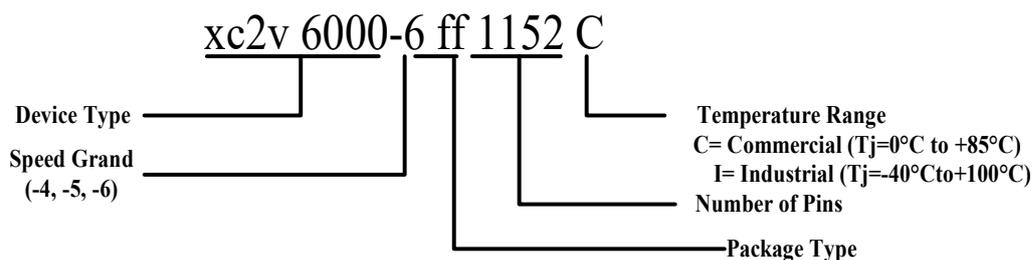


Figure B.1. Architecture générale d'un FPGA.

2.2 Les familles des FPGA

Grâce aux évolutions de la technologie microélectronique, les FPGA deviennent de plus en plus performants avec des capacités d'intégration, sans cesse augmentées. Longtemps réalisées autour de blocs logiques configurables à base de LUT (Look Up Table), les récentes familles FPGA (VIRTEX-II, VIRTEX-II pro) peuvent aujourd'hui comporter des mémoires de 18 kbits, de blocs multiplieurs et processeurs.

Les circuits FPGA de XILINIX sont caractérisés par une nomenclature spécifique qui définit les performances de chaque famille. Cette nomenclature est la suivante:



3 Description du logiciel MATLAB

MATLAB, c'est un logiciel permettant d'effectuer des opérations complexes sur des matrices et vecteurs directement avec la syntaxe matricielle (presque la même écriture que dans les livres et publications). MATLAB, c'est un interpréteur d'opérations matricielles. C'est aussi un langage de programmation de haut niveau.

MATLAB est écrit en C, mais il ne demande aucune connaissance du C de l'utilisateur.

Avec MATLAB, on peut effectuer tout ce que l'on peut faire avec un langage de programmation, mais beaucoup plus rapidement et efficacement. C'est un outil de recherche et d'application fantastique pour qui maîtrise bien l'écriture matricielle (et ses notions d'algèbre linéaire).

Bibliographié

- [1] S.Mohamed Ait- Chikh, « *Etude Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques* », mémoire de magister, ENP, Décembre 2007.
- [2] F.Chekired, « *étude et implémentation d'une commande MPPT neurone-flou sur un circuit FPGA* », mémoire de magister, ENP, 2008.
- [3] M. ISSAADI Salim, « *Commande d'une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones* », mémoire de magister, ENP, 2006.
- [4] K.Touafek, « *Etude théorique des capteurs hybrides photovoltaïques thermiques* », mémoire de magister, ENP, 2005.
- [5] M.Kherchi et Smaïli Mohamed Djamel, « *étude et implémentation d'une commande MPPT neurone-floue sur FPGA* », mémoire ingéniera, ENP ,2009.
- [6] O.Amrani, D.Rekioua, « *Etude et identification des différents modèles électroniques photovoltaïque* », article, université de Bejaia, Algérie.
- [7] H.L.Macomber et John B.Ruzek, « *photovoltaic Stand-Alone Systems* », liver, NASA, USA, 1979.
- [8] M.Ansoumane Camara, « *Modélisation du stockage de l'énergie photovoltaïque par super condensateurs* », thèse doctorat, université Gamal Abdel Nasser, Guinée, 2011.
- [9] D.BOUKHERS, « *Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage* », thèse magister, université des frères mentouri, Constantine, 2007.
- [10] Francisco J. García Sánchez et Adelmo Ortiz-Conde, « *Applications of Lambert's W function to electron device modeling (partie 1)* », cours, université Simon bolivar, Venezuela, 2006.

- [11] A. Zaatriet et S. Belhour, « *reconstitution de la caractéristique I–V et détermination de la puissance d'un système photovoltaïque* », article, Revue des Energies Renouvelables, Université des Frères Mentouri, Constantine, Algérie, 2009.
- [12] K. Chuen Kong, M. bin Mamat, M. Zamri Ibrahim et A. Majeed Muzathik, « *New Approach on Mathematical Modeling of Photovoltaic Solar Panel* », Article, Université Malaysia Terengganu, Malaysia, 2012.
- [13] J.Robert Buchanan, « *Cubic Spline Interpolation* », cour, Dublin City Université, Ireland, 2010.
- [14] S. McKinley et M. Levine, « *Cubic Spline Interpolation* », article, London, UK, 2007.
- [15] Francisco J. G.Sánchez et A.Ortiz-Conde, « *Applications of Lambert's W function to electron device modeling (partie 2)* », cour, université Simón Bolívar, Venezuela, 2006.
- [16] « *KC200GT, Kyocera multicrystal photovoltaic modules* », datasheet.
- [17] M. Belhadj, « *Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome* », Mémoire Magister, Centre Universitaire De Bechar, Algérie, 2008.
- [18] N.Zaidi et M.Annane, « *Implémentation d'un modèle simple d'une cellule photovoltaïque sur FPGA* », mémoire master, université Saad Dahleb de Blida, 2011.