

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Hassiba Benbouali de Chlef

Faculté de Technologie

Département d'Electrotechnique



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de

DOCTORAT EN SCIENCES

Spécialité : Electrotechnique

Par

FATMA ZOHRA KESSAISSIA

Thème :

**Caractérisation et modélisation des cellules, modules et bus continu
HVDC photovoltaïque par les plans d'expériences (Design of
Experiments method)**

Soutenue le 30/11/2020, devant le jury composé de :

Djilali BEN YUCEF	Professeur	Université de Chlef	Président
Abdallah ZEGAOU	MCA	Université de Chlef	Rapporteur
Michel AILLERIE	Professeur	Université de Lorraine, France	Co-Rapporteur
Mhamed HELAIMI	MCA	Université de Chlef	Examineur
Mhamed SEKOUR	MCA	Université de Saida	Examineur
Mohamed MANKOUR	MCA	Université de Saida	Examineur
Rachid TALEB	Professeur	Université de Chlef	Invité
Chahinez FARES	MCA	Université de Chlef	Invitée

*Je dédie ce travail
À tous ceux qui me sont chers*

Remerciements

Je remercie Dieu **ALLAH** tout puissant de m'avoir accordé la volonté et le courage pour réaliser ce travail après tant de difficultés presque insurmontables.

Je tiens particulièrement à remercier Docteur **Abdallah ZEGAOUI** mon Directeur de thèse pour m'avoir guidé et m'avoir orienté dans mon travail des mois durant. Il m'a accordé une grande attention tout au long de mes recherches, ses conseils précieux, et sa confiance ont bien facilité l'aboutissement de cet exploit.

Mes sincères remerciements vont au Professeur **Michel AILLERIE** de l'Université de Lorraine, Metz, France, Co-Directeur de thèse qui a eu l'idée de nous proposer ce nouveau et intéressant sujet de recherche. Il m'a accueilli dans son laboratoire LMOPS « Laboratoire Matériaux Optiques, Photoniques et Systèmes » pour la réalisation de la partie expérimentale. Je tiens à le remercier pour son omniprésence et ses précieux conseils.

Aussi, j'exprime ma gratitude à toute l'équipe de l'Université de Lorraine et à tous les membres du laboratoire LMOPS pour leur chaleureux accueil ; Je cite en particulier ; le Professeur **Jean Pierre CHARLES** pour son accompagnement, ainsi que les Chercheurs du Laboratoire de Thionville, le Docteur **Pierre PETIT** et le Docteur **Jean-Paul SAWICKI** pour leur minutieuse contribution à la collecte des données expérimentales.

Tous mes respects et mes vifs remerciements s'adressent au Professeur **Bachir BELMADANI**, Professeur à l'Université Hassiba Benbouali de Chlef, pour m'avoir accueilli dans son Laboratoire de recherche LGEER (Laboratoire de Génie Electrique et Energies Renouvelables).

Je suis très honorée que Monsieur le Professeur **Djilali BEN YUCEF** ait accepté la présidence du jury, que Messieurs le Docteur **Mhamed HELAIMI** de l'Université de Chlef, le Docteur **Mhamed SEKOUR** de l'Université de Saida et le Docteur **Mohamed MANKOUR** de l'Université de Saida aient accepté la charge de juger et d'examiner cette thèse. Leur présence m'apporte une incontestable caution scientifique.

Je tiens à remercier vivement le Professeur **Rachid Taleb**, pour son assistance, son soutien moral et son encouragement.

Je tiens à remercier la Doyenne de la Faculté de Technologie ; la Docteur **Chahinez FARES**, pour son assistance à la planification et à la conception de méthodes de calcul au logiciel JMP.

Aussi, je remercie le Secrétaire Général de la Faculté de Technologie, Monsieur **Djemal ANIOUR** pour ses vifs encouragements, ainsi que le Docteur **Hadj ALLOUACHE**, Vice-Doyen de la Pédagogie à la Faculté de Technologie pour son assistance et son accompagnement durant les stages en France.

Je témoigne aussi ma parfaite reconnaissance aux Docteurs **Mustapha ARAB**, **Aicha AISSA BOKHTACHE** et **Asma TOUALBIA** pour le soutien moral qu'ils m'ont apportée et pour leurs encouragements incessants.

Mes vifs remerciements s'adressent également à toute ma famille, mes amies, **Amina**, **Amel**, **Aicha** et **Nabila** ainsi qu'à tous mes collègues de la Faculté de technologie.

Enfin, je m'adresse à tous ceux qui ont eu la délicatesse de m'aider de près ou de loin, que cet humble travail soit pour eux une preuve de ma plus profonde et sincère gratitude.

Résumé

L'objectif de ce travail réalisé dans le cadre d'une thèse de l'Université Hassiba Ben Bouali de Chlef et intitulée : « caractérisation et modélisation des cellules, modules et bus continu HVDC photovoltaïque par les plans d'expériences (Design of Experiments method) » est de modéliser l'influence des paramètres environnementaux sur le comportement des systèmes de production d'énergie renouvelable. Une chaîne photovoltaïque (PV) est constituée, à minima, d'un générateur PV, un convertisseur d'énergie alimentant un bus de transport et de distribution d'énergie que nous avons choisi continu, pour être destiné au transport d'énergie électrique via un bus continu haute tension.

Dans le cadre de notre thématique de recherche, nous avons procédé à la modélisation et à la caractérisation de modules photovoltaïques de différentes technologies : monocristalline, multicristalline et amorphe ainsi que le bus continu HVDC (High Voltage Direct Current) par une méthode originale dans ce cas, la méthode des plans d'expériences. Cette méthode est connue sous le nom « Design of Experiments, DOE » et permet de prédire le comportement futur des systèmes modélisés.

L'objectif principal de cette contribution est d'appliquer la méthode des plans d'expériences, DOE pour étudier le comportement du système sous différentes conditions d'éclairement et de température, ainsi que les effets propres et les effets des interactions entre les variables d'entrée et leur influence sur une sortie spécifique, caractéristique du système étudié, ici un système de production PV. Une étape de planification expérimentale et de description du système étudié est nécessaire pour le choix d'un plan d'expérience convenable utile et suffisant pour réaliser les expériences voulues. Toutes les étapes de la méthode sont ici présentées. Son application se révèle être un outil intéressant dans la maîtrise de la production attendue d'un système PV.

Mots clés : *Méthode des plans d'expériences (DoE), Bus continu haute tension (HVDC), Modélisation, Caractérisation, Générateur PV, Planification expérimentale, Plan d'expérience, Effets propres, Effets des interactions.*

Abstract

The aim of this work, which was carried out as part of a thesis by Hassiba Ben Bouali University in Chlef, entitled: "Characterization and modeling of photovoltaic cells, modules and HVDC bus by the Design of Experiments method" is to model the influence of environmental parameters on the behavior of renewable energy production systems. A photovoltaic chain (PV) consists, at a minimum, of a PV generator, an energy converter feeding on a continuous transmission and distribution bus that we have chosen to be used for the transport of electrical energy via a continuous high voltage bus.

As part of our research theme, we have modeled and characterized photovoltaic modules of different technologies: monocrystalline, polycrystalline and amorphous as well as the continuous bus HVDC (High Voltage Direct Current) by an original method in this case, the method of experimental design. This method is known as "Design of Experiments, DOE" and allows us to predict the future behavior of modeled systems.

The main purpose of this contribution is to apply the design of experiments method, DOE, to study the behavior of the system under different conditions of illumination and temperature, as well as the specific effects and effects of interactions between input variables and their influence on a specific output, characteristic of the system studied, here a PV production system. A step in experimental planning and description of the system being studied is necessary for the selection of a suitable plan of experience that is useful and sufficient to carry out the required experiments. All steps of the method are presented here. Its application is proving to be an interesting tool in mastering the expected production of a PV system.

Keywords: *Design of experiments method (DoE), High voltage direct current bus (HVDC), Modeling, Characterization, PV generator, experimental planning, design of experiment, specific effects, effects of interactions.*

ملخص

الهدف من هذا العمل المنجز في إطار أطروحة جامعة حسبية بن بو علي الشلف بعنوان: "تصنيف ونمذجة الخلايا، الوحدات و الناقل HVDC من خلال خطط التجارب (تصميم التجارب) هو نمذجة تأثير العوامل البيئية على سلوك أنظمة إنتاج الطاقة المتجددة. تتكون شبكة الفولطائية على الأقل من مولد PV، محول طاقة يزود ناقل نقل الطاقة وتوزيعها الذي اخترناه على أنه مستمر، بغرض نقل الطاقة الكهربائية عبر ناقل تيار مستمر عالي الجهد.

في إطار موضوعنا البحثي، قمنا بنمذجة وتمييز الوحدات الكهروضوئية من تقنيات مختلفة: أحادي البلورية، متعدد البلورات وغير متبلور بالإضافة إلى الناقل المستمر HVDC (الجهد المستمر العالي التوتر) بطريقة أصلية في هذه الحالة، طريقة تصميم التجارب. تُعرف هذه الطريقة باسم "تصميم التجارب, DOE" وتتيح إمكانية التنبؤ بالسلوك المستقبلي للأنظمة المنمذجة.

الهدف الرئيسي من هذه المساهمة هو تطبيق طريقة تصميم التجارب، DOE لدراسة سلوك النظام في ظل ظروف مختلفة من الإضاءة ودرجة الحرارة، وكذلك التأثيرات الخاصة وآثار التفاعلات بين متغيرات المدخلات وتأثيرها على المخرج المطلوب، خصائص النظام المدروس، وهنا نظام إنتاج الكهروضوئية. تعتبر خطوة التخطيط التجريبي ووصف النظام المدروس ضرورية لاختيار التصميم التجريبي المناسب المفيد والكافي لإجراء التجارب المطلوبة. يتم عرض جميع خطوات الطريقة هنا. يثبت تطبيقه أنه أداة مثيرة للاهتمام في التحكم في الإنتاج المتوقع لنظام الكهروضوئية.

الكلمات المفتاحية: تصميم طريقة التجارب (DoE)، ناقل التيار المستمر عالي الجهد (HVDC)، النمذجة، التوصيف، مولد PV، التخطيط التجريبي، التصميم التجريبي، التأثيرات الخاصة، تأثيرات التفاعل.

Liste des symboles

Symbole	Signification	Unité
<i>Symboles physiques, électriques et énergétiques</i>		
V_{co}	Tension à circuit ouvert	V
I_{cc}	Courant de court-circuit	A
W_c	Watt-crête	W
kg	Kilogramme	Kg
I_{ph}	Photo-courant	A
I_s	Courant de saturation de la diode	A
m	Facteur d'idéalité compris entre 1 et 2	
V	Tension aux bornes de la cellule PV	V
I	Courant produit par cette dernière	A
V_t	Tension thermique de la diode	V
k	Constante de Boltzmann	J.K ⁻¹
q	Charge de l'électron	C
T_c	Température de cellule	°K
I_D	Courant d'obscurité	A
E	L'ensoleillement ou l'énergie incidente	W/m ²
I_{MPP}	Courant au point de puissance maximale	A
V_{MPP}	Tension au point de puissance maximale	V
P_{MPP}, P_m	Puissance maximale	W
R_s	Résistance série	Ohm
R_{sh}	résistance shunt	Ohm
N_s	Nombre de cellules en série	
N_p	Nombre de cellules en parallèle	
T	Température	°C
R_{opt}	Résistance optimale	Ohm
K	Interrupteur	
D	Diode	
α	Rapport cyclique	
T	Période de découpage	s
L	Inductance	H
t	Temps	s
C_1	Condensateur	F
R_{dson}	Résistance Drain-source à l'état passante	Ohm
$L1$	Bobine primaire	H
N_1, N_2	Nombre de spires	
I_r	Irradiation solaire	mV
T	Température de surface de la cellule	°C
S	Sensibilité du pyranomètre	$\mu V / W / m^2$
I_{bus}	Courant de bus	A
V_{bus}	Tension de bus	V
I_{pv}	Courant de module PV	A

V_{pv}	Tension de module PV	V
P_{pv}	Puissance de module PV	W
P_{bus}	Puissance de bus	W

Symboles mathématiques-et statistiques

A	Coordonnées originales
x	Coordonnées centrées réduites
k	Nombre de facteurs
E_0	Effet moyen
E_1	Effet du facteur 1
E_2	Effet du facteur 2
E_{12}	Interaction température/éclairage
E_{21}	Interaction éclairage/température
x_1	Facteur 1
x_2	Facteur 2
x_{12}	Interaction entre les facteurs 1 et 2
\bar{y}	Moyenne des réponses
X	Matrice d'Hadamard ou matrice d'expériences
y	Vecteur colonne des réponses
E	Vecteur colonne des effets des facteurs et les interactions
N	Nombre d'expériences ou des essais
p	Nombre de coefficients
a	Vecteur des coefficients
x_i, x_j	Niveaux des facteurs en valeurs centrées réduites
a_0	Coefficient constant,
a_i	Coefficients d'ordre un par rapport à l'effet principal des facteurs,
a_{ij}	Coefficients représentant les interactions entre plusieurs facteurs
a_{ii}	Coefficients des termes du second degré.
X^{-1}	Matrice transposée de la matrice X
n	Nombre de niveaux
F_{obs}	Valeur observé de Fisher-Snedecor
H_0	Hypothèse statistique nulle
P	Probabilité
α	Valeur critique
n_0	Nombre de répétitions au centre du domaine
e	Vecteur colonne des résidus
$X'X$	Matrice d'information
$(X'X)^{-1}$	Matrice de dispersion
\hat{a}	Valeurs des vecteurs de coefficients des moindres carrés
H_1	Hypothèse statistique alternative ou non nulle
P_value	Probabilité critique
T_{obs}	Test statistique de Student
C_{ii}	Termes diagonaux de la matrice de dispersion $(X'X)^{-1}$

σ^2	Variance expérimentale	
σ_r^2	Variance résiduelle	
R^2	Coefficient de corrélation multiple ou de détermination	
R^2_{adj}	Coefficient de corrélation ajusté	
E_r	Erreur relative	%

Abréviations

PV	Photovoltaïque
DoE	Plans d'expériences (en Anglais : Design of Experiments)
HVDC	Bus continu haut tension (High Voltage Direct Current)
GPV	Générateur photovoltaïque
MCB	Boost à couplage magnétique (Magnetic Coupling Boost)
MPPT	Poursuite du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking)
ANOVA	Analyse de variance
I(V)	Caractéristique courant-tension
DC	Courant continu
PN	Jonction semi-conductrice constituée de deux semi-conducteurs de type N et P
TCO	Couche d'oxyde transparente conductrice (Transparent Conductive Oxide)
PPM	Point de Puissance Maximale
MPP	Maximum Power Point
<i>FF</i>	facteur de forme
DC/DC	Convertisseur de puissance Continu/Continu
DC/AC	Convertisseur de puissance Continu/Altenatif
CS	Convertisseur Statique
MOSFET	Transistor à effet de champ (Metal Oxyde Semi-conducator Field Effect Transistor)
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
MCD	Mode de conduction discontinue
MCC	Mode de conduction continue
HC	Méthode de Hill Climbing
P&O	Méthode de perturbation et d'observation
InCond	Méthode de l'incrémentation de l'inductance
MSR	Modélisation des surfaces de réponses

<i>SCE</i>	Somme des carrés des écarts
<i>ddl</i>	Nombre de degré de liberté
<i>CM</i>	Carré moyen
<i>T_Student</i>	Loi de Student
<i>SCT</i>	Somme des carrés totale
<i>SCR</i>	Somme des carrés due à la régression
<i>CMR</i>	Carrés moyens dû au modèle de régression
<i>CME</i>	Carrés moyens associés aux écarts
<i>RMSE</i>	Erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error)
IR	Infra rouge
CCR	Coordonnées centrées réduites
F Ratio	Test de Fisher-Snedecor
RPP	Rapport de performance de puissance
CCD	Plan composite centré (Composite Central Design)
2D	Deux dimensions
3D	Trois dimensions

TABLE DE MATIÈRES

Table de Matières

Introduction générale	2
Chapitre I: Technologie de module photovoltaïque et principe de fonctionnement du système d'étude	6
I.1. Introduction.....	8
I.2. Principe de la conversion photovoltaïque.....	9
I.3. Technologies de la cellule PV.....	11
I.3.1. Cellules de première génération.....	12
I.3.1.1. Cellules solaire monocristalline.....	13
I.3.1.2. Cellules solaire multi-cristalline.....	13
I.3.2. Cellules de deuxième génération.....	14
I.3.2.1. Cellules au silicium amorphe (a-Si).....	14
I.3.2.2. Cellules au tellure de cadmium (CdTe).....	15
I.3.2.3. Cellules au sélénure de cuivre d'indium (CIS).....	15
I.3.3. Cellules de troisième génération.....	15
I.3.3.1. Cellules organiques.....	16
I.3.3.2. Cellules à colorants.....	16
I.3.3.3. Cellules à multi jonctions.....	16
I.3.4. Cellules de quatrième génération.....	17
I.3.4.1. Cellules hybrides.....	17
I.3.4.2. Cellules pérovskites.....	17
I.4. Rendements de différentes technologies.....	18
I.5. Modélisation d'une cellule PV.....	19
I.5.1. Courbes et grandeurs caractéristiques d'une cellule PV.....	19
I.5.1.1. Courant de court-circuit.....	21
I.5.1.2. Tension à circuit ouvert.....	21
I.5.1.3. Point de puissance maximale.....	21
I.5.1.4. Facteur de forme.....	22
I.5.2. Modèle mathématique.....	23
I.5.3. Protection d'un GPV.....	24
I.6. Influence des variations climatiques sur la cellule photovoltaïque.....	25
I.6.1. Variations de l'énergie incidente.....	25
I.6.2. Variations de la température.....	25
I.7. Conversion énergétique d'un système PV.....	26

I.7.1.	Conversion directe.....	27
I.7.2.	Conversion via étage d'adaptation.....	27
I.8.	Convertisseur d'énergie DC/DC.....	28
I.8.1.	Convertisseur Boost.....	28
I.8.2.	Convertisseur Boost à couplage magnétique (MCB).....	31
I.9.	Algorithmes MPPT.....	32
I.9.1.	Méthode P&O.....	33
I.9.2.	Méthode de Hill Climbing.....	33
I.10.	Conclusion.....	35
Chapitre II: Méthode des plans d'expériences : Description et analyse.....		38
II.1.	Introduction.....	39
II.2.	Théorie des plans d'expériences.....	39
II.2.1.	Principe de fonctionnement.....	40
II.2.2.	Planification des plans d'expériences.....	42
II.2.3.	Variables.....	43
II.2.3.1.	Réponse.....	43
II.2.3.2.	Facteur.....	43
II.2.3.3.	Espace expérimental.....	44
II.2.3.4.	Coordonnées centrées réduites.....	45
II.2.4.	Choix du plan d'expériences.....	46
II.2.4.1.	Plan factoriel complet.....	46
II.2.4.2.	Plan factoriel fractionnaire.....	47
II.2.4.3.	Plan de Taguchi.....	48
II.2.5.	Principaux avantages et inconvénients des plans d'expériences.....	48
II.3.	Technique de criblage.....	48
II.3.1.	Modèle mathématique de premier ordre.....	52
II.3.2.	Analyses statistiques.....	56
II.3.2.1.	Analyse de variance.....	56
II.3.2.1.1.	Variance de la composante factorielle.....	56
II.3.2.1.2.	Variance de la composante résiduelle.....	58
II.3.2.1.3.	Test de Fisher-Snedecor.....	59
II.3.2.2.	Synthèse logicielle.....	60
II.3.3.	Analyse graphique.....	61
I.3.3.1.	Effets propres des facteurs.....	61

I.3.3.2.	Effets d'interactions entre facteurs.....	62
II.4.	Technique de surface de réponse.....	63
II.4.1.	Modèle mathématique de deuxième ordre.....	64
II.4.2.	Analyse statistique du modèle.....	67
II.4.2.1.	Analyse de variance.....	67
II.4.2.2.	Test de Student (T_Student).....	69
II.4.2.3.	Coefficient de corrélation multiple.....	70
II.4.2.4.	Erreur quadratique moyenne.....	71
II.4.2.5.	Erreur relative.....	71
II.4.2.6.	Synthèse logicielle.....	71
II.4.3.	Analyse graphique du modèle.....	72
II.4.3.1.	Surface de réponse.....	72
II.4.3.2.	Courbe de contour.....	73
II.5.	Conclusion.....	73
Chapitre III: Caractérisation et modélisation de différents modules PV par la méthode DoE.....		76
III.1.	Introduction.....	77
III.2.	Plan de criblage.....	78
III.2.1.	Modèle conventionnel.....	78
III.2.2.	Modèle non conventionnel.....	78
III.3.	Plan de surface de réponse.....	78
III.4.	Configuration expérimentale et mesures.....	79
III.5.	Modélisation et caractérisation de la réponse d'un module PV.....	82
III.5.1.	Modèle de régression simple.....	83
III.5.2.	Modèle de régression multiple.....	84
III.6.	Résultats et interprétation.....	85
III.6.1.	Analyse statistique de la technique de criblage.....	85
III.6.2.	Analyse graphique de la technique de criblage.....	90
III.6.3.	Analyse statistique de la technique de surface de réponse.....	95
III.6.4.	Analyse graphique de la technique de surface de réponse.....	103
III.7.	Conclusion.....	106
Chapitre IV: Modélisation, simulation et caractérisation de bus continu HVDC par la méthode DOE.....		109
IV.1.	Introduction.....	110

IV.2.	Caractéristiques du bus continu HVDC.....	111
IV.3.	Caractérisation et expérimentation.....	112
IV.4.	Modélisation mathématique du bus continu HVDC.....	117
IV.4.1.	Modèle de régression simple.....	117
IV.4.2.	Modèle de régression multiple.....	118
IV.5.	Résultats et interprétation.....	118
IV.5.1.	Analyse statistique de la technique de criblage.....	118
IV.5.1.1.	Tension de bus.....	119
IV.5.1.2.	Courant de bus.....	122
IV.5.1.3.	Puissance de bus.....	124
IV.5.2.	Analyse graphique de la technique de criblage.....	126
IV.5.2.1.	Effets moyens des réponses du module PV multicristallin.....	126
IV.5.2.2.	Effets moyens des réponses du module PV monocristallin.....	128
IV.5.2.3.	Effets d'interaction des réponses du module PV multicristallin.....	129
IV.5.2.4.	Effets d'interaction des réponses du module PV monocristallin.....	131
IV.5.3.	Analyse statistique de la technique de surface de réponse.....	132
IV.5.3.1.	Tension de bus.....	133
IV.5.3.2.	Courant de bus.....	135
IV.5.3.3.	Puissance de bus.....	137
IV.5.4.	Analyse graphique de la technique de surface de réponse.....	140
IV.5.4.1.	Analyse graphique pour module multi_cristallin.....	141
IV.5.4.2.	Analyse graphique pour module monocristallin.....	141
IV.6.	Conclusion.....	142
	Conclusion générale	145
	Références	149
	Liste des travaux	167
	Annexes	173

Liste des figures

Chapitre I

Fig. I.1. Principe d'une cellule photovoltaïque.....	9
Fig. I.2. Fonctionnement de la jonction PN.....	11
Fig. I.3. Processus de fabrication de module PV au silicium cristallin.....	12
Fig. I.4. Comparaison des rendements de différentes technologies de cellules et modules photovoltaïque.....	18
Fig. I.5. Développement des rendements de cellules photovoltaïque en laboratoires.....	19
Fig. I.6. Courbe caractéristique d'une cellule PV en mode générateur.....	19
Fig. I.7. Caractéristique I(V) d'une cellule PV à gauche et son schéma équivalent à droite.....	20
Fig. I.8. Facteur de forme, quotient de la surface hachurée à la surface non hachurée.....	22
Fig. I.9. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle.....	23
Fig. I.10. Association de deux modules en parallèles.....	24
Fig. I.11. Modèles de simulation de l'influence de variation d'irradiation sur les caractéristiques P(V).....	25
Fig. I.12. Caractéristique P(V) pour différents températures, simulés sous l'environnement Matlab/Simulink.....	26
Fig. I.13. Conversion directe entre GPV-Charge.....	27
Fig. I.14. Connexion GPV- Charge DC via un étage d'adaptation.....	28
Fig. I.15. Schéma de base d'un boost habituel.....	29
Fig. I.16. Schéma équivalent du boost quand l'interrupteur est fermé.....	29
Fig. I.17. Schéma équivalent du boost quand l'interrupteur est ouvert.....	30
Fig. I.18. Schéma de principe du Boost à couplage magnétique.....	31
Fig. I.19. Principe de la méthode HC.....	34
Fig. I.20. Algorithme de la méthode HC.....	35

Chapitre II

Fig. II.1. Schéma représentatif de la méthode <i>DoE</i>	41
--	----

Fig. II.2. Schéma synoptique de la méthode des plans d'expériences.....	42
Fig. II.3. Représentation d'un plan d'expérimentation à deux facteurs.....	44
Fig. II.4. Délimitation du domaine d'étude ; (a) choix des points expérimentaux selon la méthode traditionnelle et (b) choix des points expérimentaux selon les plans d'expériences.....	45
Fig. II.5. Illustration d'un plan factoriel complet.....	47
Fig. II.6. Plan factoriel complet avec valeur de réponse.....	49
Fig. II.7. Capture d'écran des résultats de l'analyse de la variance du software de l'exemple étudié.....	61
Fig. II.8. Présentation graphique des effets des facteurs, à gauche l'effet du facteur 1 et à droite l'effet du facteur 2.....	62
Fig. II.9. Effet d'interactions entre facteurs, à gauche E_{12} et à droite E_{21}	63
Fig. II.10. Illustration d'un plan composite centré pour deux facteurs.....	64
Fig. II.11. Exemple d'une surface de réponse.....	72
Fig. II.12. Exemple d'une courbe de contour.....	73
 Chapitre III	
Fig. III.1. Banc d'essai (a) schéma de principe, (b) banc expérimental.....	79
Fig. III.2. Source d'irradiation artificielle DELTALB 6 KW.....	80
Fig. III.3. A droite le pyranomètre, à gauche le thermomètre IR.....	81
Fig. III.4. Illustration des effets des facteurs sur la puissance maximale.....	91
Fig. III.5. Illustration de l'effet d'interaction des facteurs sur la puissance maximale.....	91
Fig. III.6. Surface de réponse et courbe de contour de la puissance maximale.....	92
Fig. III.7. Illustration des effets des facteurs sur la tension à circuit ouvert.....	92
Fig. III.8. Illustration de l'effet d'interaction sur la tension à circuit ouvert.....	93
Fig. III.9. Surface de réponse et courbe de contour de la tension à circuit ouvert.....	93
Fig. III.10. Illustration des effets des facteurs sur le courant de court-circuit.....	94
Fig. III.11. Illustration de l'effet d'interaction sur le courant de court-circuit.....	94
Fig. III.12. Surface de réponse et courbe de contour du courant de court-circuit.....	95
Fig. III.13. Surface de réponses et courbes de contours des trois réponses du module multi-cristallin.....	103

Figure III.14. Surface de la réponse de puissance maximale des modèles de régression multiple, (a) multi-cristallin, (b) monocristallin et (c) amorphe respectivement.....	104
Fig. III.15. Courbes de contour de la réponse de puissance maximale des modèles de régression multiple, (a) multi-cristallin, (b) monocristallin et (c) amorphe respectivement.....	104
Fig. III.16. Surfaces de réponses et courbes de contour de la réponse tension à circuit ouvert des modèles de régression multiple, (a) multi-cristallin, (b) monocristallin et (c) amorphe respectivement.....	105
Fig. III.17. Surfaces de réponses et courbes de contour de la réponse courant de court-circuit des modèles de régression multiple, (a) multi-cristallin, (b) monocristallin et (c) amorphe respectivement.....	105

Chapitre IV

Fig. IV.1. Variation du courant de bus en fonction de la tension de bus dans des conditions variables.....	111
Fig. IV.2. Simulation du courant de bus en fonction de la tension de bus dans des conditions variables.....	112
Fig. IV.3. Banc d'essai utilisé pour différentes mesures expérimentales.....	113
Fig. IV.4. Schéma de principe du circuit d'expérimentation.....	113
Fig. IV.5. Plan factoriel de la réponse tension de bus.....	117
Fig. IV. 6. Effets moyens de la réponse tension de bus.....	126
Fig. IV. 7. Effets moyens de la réponse courant de bus.....	127
Fig. IV.8. Effets moyens de la réponse puissance de bus.....	127
Fig. IV.9. Effet moyen de la réponse tension de bus.....	128
Fig. IV.10. Effet moyen de la réponse courant de bus.....	128
Fig. IV.11. Effet moyen de la réponse puissance de bus.....	129
Fig. IV.12. Effet d'interaction de la réponse tension de bus du module PV multi-cristallin, (a) l'interaction irradiation/température et (b) l'interaction température/irradiation.....	130
Fig. IV.13. Effet d'interaction de la réponse courant de bus du module PV multi-cristallin, (a) l'interaction irradiation/température et (b) l'interaction température/irradiation.....	130

Fig. IV. 14. Effet d'interaction de la réponse puissance de bus du module PV multicristallin, (a) l'interaction irradiation/température et (b) l'interaction température/irradiation.....	131
Fig. IV.15. Effet d'interaction de la réponse tension de bus du module PV monocristallin, (a) l'interaction irradiation/température et (b) l'interaction température/irradiation.....	131
Fig. IV.16. Effet d'interaction de la réponse courant de bus du module PV monocristallin, (a) l'interaction irradiation/température et (b) l'interaction température/irradiation.....	132
Fig. IV.17. Effet d'interaction de la réponse puissance de bus du module PV monocristallin, (a) l'interaction irradiation/température et (b) l'interaction température/irradiation.....	132
Fig. IV. 18. Surface de réponse et courbe de contours des réponses du module multicristallin (a) tension de bus, (b) courant de bus, (c) puissance de bus respectivement.....	141
Fig. IV. 19. Surface de réponse et courbe de contours des réponses du module monocristallin (a) tension de bus, (b) courant de bus, (c) puissance de bus respectivement.....	142

Liste des tableaux

Table 2.1. Matrice des essais d'un exemple de plan factoriel complet.....	49
Table 2.2. Niveaux des facteurs.....	50
Table 2.3. Exemple de calcul des effets moyens d'un plan factoriel complet.....	52
Table 2.4. Analyse de la variance d'un plan factoriel complet.....	60
Table 2.5. Analyse de régression générale.....	69
Table 3.1. Caractéristiques électriques de la fiche technique des modules PV dans des conditions de tests standards ($1000W/m^2$, AM1.5 et 25 °C) (plaque signalétique et datasheets).....	80
Table 3.2. Les observations expérimentales et les réponses désirées pour les trois modules PV.....	82
Table 3.3. Niveaux des facteurs et leurs coordonnées centrées réduites (CCR).....	83
Table 3.4. Données expérimentales du modèle de régression simple.....	83
Table 3.5. Test des effets des paramètres de la puissance maximale.....	86
Table 3.6. Table d'ANOVA du modèle de la puissance maximale.....	86
Table 3.7. Estimation des paramètres du modèle de la régression prédictif de la puissance maximale.....	87
Table 3.8. Test des effets des paramètres de la tension à circuit ouvert.....	87
Table 3.9. Table d'ANOVA du modèle de la tension à circuit ouvert.....	88
Table 3.10. Estimation des paramètres du modèle de la régression de la tension à circuit ouvert.....	88
Table 3.11. Test des effets des paramètres du courant de court-circuit.....	89
Table 3.12. Table d'ANOVA du modèle du courant de court-circuit.....	89
Table 3.13. Estimation des paramètres du modèle de la régression du courant de court-circuit.....	89
Table 3.14. Test des effets des paramètres des réponses désirées.....	96
Table 3.15. Table d'ANOVA du modèle de régression des réponses désirées.....	96
Table 3.16. Estimation des paramètres du modèle de la régression du courant de court-circuit.....	97
Table 3.17. Erreur calculée entre réponses calculée et observée de trois réponses du module multi-cristallin.....	99

Table 3.18. Calcul d'erreur entre les valeurs expérimentales et calculés du modèle prédictif de la puissance maximale.....	100
Table 3.19. Coefficient de corrélation et l'erreur quadratique des trois modules de la réponse puissance maximale.....	100
Table 3.20. Calcul d'erreur entre les valeurs expérimentales et calculés du modèle prédictif de la tension à circuit ouvert.....	101
Table 3.21. Coefficient de corrélation et l'erreur quadratique des trois modules de la réponse tension à circuit ouvert.....	101
Table 3.22. Calcul d'erreur entre les valeurs expérimentales et calculés du modèle prédictif du courant de court-circuit.....	102
Table 3.23. Coefficient de corrélation et l'erreur quadratique des trois modules de la réponse courant de court-circuit.....	103
Table 4.1. Éléments et caractéristiques du banc d'essai.....	114
Table 4.2. Données expérimentales et réponses observées du module PV multi-cristallin.....	116
Table 4.3. Données expérimentales et réponses observées du module monocristallin.....	116
Table 4.4. Données expérimentales du modèle de régression simple du module PV multi-cristallin.....	117
Table 4.5. Données expérimentales du modèle de régression simple du module PV monocristallin.....	118
Table 4.6. Test des effets des paramètres de la tension de bus.....	120
Table 4.7. Table d'ANOVA du modèle de la tension de bus.....	120
Table 4.8. Estimation des paramètres du modèle de la régression prédictif de la tension de bus.....	121
Table 4.9. Test des effets des paramètres du courant de bus.....	122
Table 4.10. Table d'ANOVA du modèle du courant de bus.....	123
Table 4.11. Estimation des paramètres du modèle de la régression prédictif du courant de bus.....	123
Table 4.12. Test des effets des paramètres de la puissance de bus.....	124
Table 4.13. Table d'ANOVA du modèle de la puissance de bus.....	124
Table 4.14. Estimation des paramètres du modèle de la régression prédictif de la puissance de bus.....	125
Table 4.15. Estimation de coefficient de corrélation multiple et l'erreur quadratique moyenne du modèle de régression simple.....	125

Table 4.16. Test des effets des paramètres de la réponse tension de bus.....	133
Table 4.17. Table d'ANOVA du modèle de régression de la réponse tension de bus.....	134
Table 4.18. Estimation des paramètres du modèle de la régression de la tension de bus...	134
Table 4.19. Test des effets des paramètres de la réponse courant de bus.....	135
Table 4.20. Table d'ANOVA du modèle de régression de la réponse courant de bus.....	136
Table 4.21. Estimation des paramètres du modèle de la régression du courant de bus....	136
Table 4.22. Test des effets des paramètres de la réponse puissance de bus.....	137
Table 4.23. Table d'ANOVA du modèle de régression de la réponse puissance de bus...	138
Table 4.24. Estimation des paramètres du modèle de la régression de la puissance de bus.....	138
Table 4.25. Erreur des trois réponses du module multi-cristallin.....	139
Table 4.26. Erreur des trois réponses du module monocristallin.....	140
Table 4.27. Estimation de coefficient de corrélation multiple et l'erreur quadratique moyenne du modèle de régression multiple.....	140

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

La récente augmentation des développements démographiques, économiques, industriels et environnementaux nécessite une utilisation massive de ressources énergétiques propres et nécessite une évolution rapide du matériel et de la technologie afin de réduire la pollution, de contribuer positivement à un changement climatique plus faible permettant un développement durable. Actuellement, les énergies renouvelables, l'environnement et le développement durable font parmi des axes primordiaux des recherches et politiques publiques au niveau mondial et les travaux sur les nouvelles sources alternatives qui peuvent résoudre les problèmes sont régulièrement énoncés par l'ensemble des comités en charge de l'environnement que ce soit au niveau national ou mondial.

Les énergies renouvelables prennent une place importante dans les nouvelles ressources de production de l'énergie électrique, et comme solution pour remplacer les combustibles fossiles. Ces derniers, utilisés depuis la révolution industrielle sont malheureusement aussi à l'origine de pollutions atmosphériques, de grand rejet du gaz à effet de serre, et ne sont pas infinis car ils seront épuisés dans les prochaines années (en fonction de la croissance mondiale de leur consommation), ce qui encourage l'utilisation des énergies nouvelles et renouvelables, peu polluantes, et par définition de capacité infinie. Parmi elles, l'énergie solaire photovoltaïque (PV) est une source d'énergie renouvelable parmi plusieurs sources existent dans la nature ; elle est considérée probablement comme source d'énergie du future ; elle est gratuite, propre et inépuisable. L'énergie PV a connu une immense diffusion et de nombreux développements dus à une recherche active partout dans le monde. Cette recherche au niveau matériaux, composants et systèmes a permis une véritable évolution des différents éléments nécessaires à la production et la distribution de l'énergie photovoltaïque en améliorant aux différents niveaux, le rendement et donc la production d'énergie électrique.

De ce fait et dans cet objectif, de nombreux travaux de recherches ont été élaborés, que ce soit sur le plan expérimental ou théorique. En ce qui concerne plus spécifiquement nos travaux, il est à noter qu'il existe dans la littérature des travaux présentant les résultats des méthodes de modélisation des systèmes photovoltaïques à base de modules PV. Généralement, ces méthodes nécessitent soit une connaissance approfondie des propriétés électroniques et/ou physiques de la technologie et du fonctionnement des systèmes photovoltaïques, soit sont basées sur des fiches techniques fournies par les constructeurs. Par ailleurs d'un point de vue modélistique, ces méthodes sont basées sur des modèles mathématiques qui ne reflètent pas exactement le comportement réel [Kess15, Mens19, Sari19]. En tenant compte des économies considérables de temps, de ressources financières et matérielles que nous pouvons espérer dans le développement via la modélisation de nouveaux systèmes photovoltaïques, la méthode des plans d'expériences ou Design of Experiments (*DoE*) est adaptée pour offrir un outil simple et pratique pour l'étude, l'évaluation, la modélisation et la caractérisation de l'influence des paramètres significatifs, capables de modifier la réponse de ces systèmes. La méthode *DoE* a été utilisée dans différents aspects de recherche et même industriels. A notre connaissance basée sur la littérature, elle est dans les travaux de notre équipe appliquée de façon originale aux systèmes photovoltaïques.

La méthode *DoE* est principalement utilisée dans la conception de nouveaux produits industriels ou dans le processus d'analyse statistique [Das16, Cohe16], l'optimisation des paramètres d'un processus de fabrication [Saha11], l'amélioration de ses performances [Mont07] ou dans la caractérisation de son modèle comportemental [Kess18]. La méthode *DoE* apparaît comme une méthode alternative pour évaluer les facteurs significatifs et leurs influences sur la réponse d'un système faisant l'objet d'expériences avec les avantages qu'elle ne nécessite pas la connaissance du modèle physique du processus à étudier [Moço16]. En effet, le principal avantage de la méthode *DoE* pour la modélisation du fonctionnement d'un système est sa capacité à prédire les effets individuels ainsi que les interactions entre les différentes variables impliquées dans l'expérience sur ce système [Mich15, Kess20a, Kess20b] sans nécessiter, a priori, une connaissance spécifique approfondie du système lui-même. Il est tout de fois à noter que l'application par la méthode *DoE* d'un système spécifique ne peut se faire que par un spécialiste du système ou de la technologie sur laquelle le système se base permettant un choix pertinent du plan d'expérience à appliquer. Par ailleurs, pour caractériser et modéliser n'importe quel système, la méthode *DoE* minimise significativement le nombre d'expériences sans dégrader la précision de la réponse [Goup07], i.e. il fournit un maximum d'informations sur la réponse avec un minimum d'essais expérimentaux. Pour modéliser un phénomène, la méthode *DoE* est souvent concernée par un ensemble de variables indépendantes, appelées « facteurs » pouvant modifier une variable dépendante, noté « réponse du système ».

Ainsi, en associant les compétences dans les systèmes de productions d'énergie d'origine photovoltaïque, et celles dans le développement de méthodes et d'outils de modélisation et en considérant l'originalité dans le fait de les associer, ce travail de thèse est consacré à la modélisation et à la caractérisation de cellules, modules et bus continu HVDC photovoltaïque par la méthode des plans d'expériences (en Anglais : Design of Experiments method ou *DoE* method).

Dans la contribution actuelle, nous nous concentrons sur la caractérisation, la modélisation et l'étude avec la méthode *DoE* du comportement de trois modules photovoltaïques de différentes technologies de silicium, i.e. monocristalline, multi-cristalline et amorphe. Ces trois technologies sont les plus utilisées actuellement. En tant que paramètres d'entrée du modèle prédictif établi, on considère à la fois l'irradiation solaire et la température de surface de la cellule photovoltaïque sachant qu'il est bien établi que ces deux paramètres sont les deux paramètres nécessaires à considérer dans le rendement dynamique des cellules. En tant que réponse en sortie, on considère les paramètres électriques, à savoir le courant de court-circuit, la tension à circuit ouvert et la puissance maximale disponible du module PV dans une première partie, et la tension de bus, le courant de bus et la puissance de bus dans une seconde partie. Tous ces paramètres fonctionnels sont simplement obtenus à partir de mesures effectuées dans un domaine d'étude limité par des points expérimentaux. Pour une implémentation correcte de la méthode *DoE* appliquée à la modélisation des panneaux photovoltaïques, nous avons développé notre propre programme *DoE* sous environnement logiciel MATLAB permettant la détermination du modèle prédictif en vue de l'évaluation de tout effet significatif et corrélation entre paramètres affectant la réponse du système PV. La

validation de nos résultats est faite par comparaison des résultats obtenus par MATLAB et ceux trouvés par un logiciel JMP spécialisé dans le domaine des plans d'expériences.

Afin de présenter nos travaux, le manuscrit de thèse est divisé en quatre chapitres distincts :

Le premier chapitre aborde la structure générale du générateur d'énergie d'origine photovoltaïque qui constitue le système d'étude, avec ses principaux composants ainsi qu'une description de son principe de fonctionnement. Une présentation et analyse des trois étages complémentaires du système, est également présentée. Le premier étage est destiné à expliquer le principe de fonctionnement d'un générateur photovoltaïque, GPV, sa modélisation et les paramètres intervenant dans le système pouvant influencer les variables de sorties. Le deuxième étage est consacré à l'étage d'adaptation doté d'un hacheur élévateur BOOST de type MCB (Magnetic Coupling Boost) reliant le GPV à la charge, commandé par un algorithme de poursuite du point de puissance maximale MPPT (Maximum Power Point Tracking). Cet étage sert d'adaptation d'impédance et de puissance (tension et courant) entre le GPV et la charge. Cette puissance maximale est transférée à la charge via un bus continu haut tension HVDC (High Voltage Direct Current) également présenté dans ce chapitre.

Le deuxième chapitre donne une présentation générale de la méthode des plans d'expériences *DoE* (en Anglais : Design of Experiments method), son principe de fonctionnement ainsi que les principales étapes servant à atteindre l'objectif de l'étude. Ensuite, nous détaillons une description de différents plans pouvant être utilisés pour analyser un tel comportement de la sortie d'un système étudié. Deux techniques donnent naissance à deux modèles prédictifs de la variable de sortie du système, nécessitant chacun une analyse statistique pour évaluer et estimer la variable de sortie. Cette analyse statistique est divisée en deux sortes d'analyses : une analyse de la variance ANOVA et une analyse graphique.

Le troisième chapitre présente plus spécifiquement nos développements et résultats de la modélisation et de la caractérisation de modules photovoltaïques de technologies différentes : multi-cristalline, monocristalline et amorphe par la méthode des plans d'expériences, *DoE* méthode. Trois sorties de notre système ont été traitées pour les trois modules PV : la puissance maximale délivrée par le module PV, la tension à circuit ouvert et le courant de court-circuit autant que trois points essentiels de la courbe caractéristique courant-tension $I(V)$. Différents plans ont été proposés pour étudier, modéliser et caractériser le comportement de la variable de sortie dépendante en fonction des variables d'entrées indépendantes, aboutissant aux modèles prédictifs des trois sorties du système doté chacun d'une analyse statistique permettant d'évaluer les variables les plus significatives et les plus influentes capable de modifier la variable de sortie.

Le quatrième chapitre est consacré à la modélisation à la caractérisation du bus continu haut tension HVDC (High Voltage Direct Current) photovoltaïque par la méthode *DoE*. Une modélisation mathématique du bus continu HVDC est faite. C'est une étape nécessaire pour une meilleure planification des expériences pouvant être réalisées par la suite. Deux modèles ont été proposés pour estimer les réponses du système désiré. Chaque modèle est prédéfini par des méthodes de régressions, afin de calculer les coefficients du modèle et de procurer parmi

eux, lesquels sont significatifs. Tout modèle mathématique prédit peut être jugé en utilisant des tests statistiques sous forme d'une analyse de variance ANOVA et d'une analyse graphique permettant d'aider à l'interprétation des résultats obtenus par la simulation.

Enfin, ce manuscrit se termine par une discussion, un bilan, une conclusion et des perspectives ouvertes par ce travail.

L'ensemble de ces développements sont accompagnés de différents outils de lectures comme les listes de figures, les listes de références et des symboles utilisés.

CHAPITRE I

Chapitre I

Technologie de module photovoltaïque et principe de fonctionnement du système d'étude

I.1. Introduction.....	8
I.2. Principe de la conversion photovoltaïque.....	9
I.3. Technologies de la cellule PV.....	111
I.4. Rendements de différentes technologies.....	188
I.5. Modélisation d'une cellule PV.....	19
I.6. Influence des variations climatiques sur la cellule photovoltaïque.....	255
I.7. Conversion énergétique d'un système PV.....	266
I.8. Convertisseur d'énergie DC/DC.....	28
I.9. Algorithmes MPPT.....	322
I.10. Conclusion.....	366

I.1. Introduction

La demande mondiale d'énergie électrique a connu une immense évolution due à l'incroyable accroissement des besoins de différents secteurs à cette énergie vitale depuis la révolution industrielle du début du XXème siècle. Par ailleurs, la production d'énergie électrique à partir des ressources fossiles participe grandement à la pollution atmosphérique et le contexte énergétique actuel a connu un appauvrissement de ces réserves fossiles avec une augmentation du réchauffement climatique causé par les émissions de gaz à effet de serre [Manu19]. Ainsi est apparu le concept de développement durable, énoncé par plusieurs établissements de protection de l'environnement, également sujet de plusieurs sommets internationaux dans le monde. Cela nous pousse à enrichir le mix énergétique, soit à échelle locale ou mondiale, par l'appoint avec des solutions énergétiques alternatives aux énergies fossiles.

Les énergies renouvelables (solaire, éolienne, hydraulique...) sont d'ores et déjà répandues dans le monde et ne cessent de prouver leur part de contribution dans le mix énergétique mondiale dans le présent et dans les énergies futures de part leurs caractères écologiques et de ressources inépuisables. Dans le monde entier, et donc en Europe et en Algérie également, les chercheurs comme les industriels sont actuellement penchés sur l'exploitation de la source énergétique provenant du soleil qui assure la plus grande source d'énergie. L'énergie solaire photovoltaïque joue un rôle prépondérant dans la participation de la conversion d'énergie d'origine renouvelable en énergie électrique vu l'augmentation importante de la demande sur l'énergie électrique causée par l'immense développement démographique, économique et industriel. De plus, l'énergie solaire est une source d'énergie renouvelable disponible et gratuite et l'énergie fournie par le soleil en une heure est égale à la quantité d'énergie requise par l'homme en un an [Anka13]. Dans la consommation électrique, les panneaux solaires photovoltaïques sont utilisés dans de nombreuses applications allant de l'éclairage public des villes et des régions rurales, l'alimentation des sites isolés, l'alimentation du bâtiment jusqu'à la réalisation de centrale solaire de forte puissance.

De fait, l'énergie solaire photovoltaïque est la source d'énergie la plus prometteuse, la plus abondante sur terre et la plus propre pour l'environnement [Zega12, Pare19]. On peut encore citer comme exemples d'utilisations, son intégration pour une part dans l'électrification des zones en milieu urbain ainsi qu'aux zones rurales ou aux sites isolées [Quan13], le pompage de l'eau, la charge des batteries et les systèmes PV connectés au réseau [Anka13].

La production d'électricité d'origine solaire utilisant pour la conversion lumière-électrique des générateurs photovoltaïques présente des avantages importants [Fraa14] : la ressource d'énergie utilisée est renouvelable et gratuite, le processus de production d'électricité n'a aucun impact sur l'environnement. La production d'électricité est réalisée sans qu'il n'y ait aucune pièce en mouvement d'où les faibles frais de maintenance et l'exploitation aisée (les modules sont auto-nettoyés avec la pluie) et enfin la production peut être consommée sur place ce qui réduit les pertes dans les câbles.

Ce chapitre introductif se décompose de trois grandes parties. En un premier temps, je décris brièvement les principes de la conversion photovoltaïque, les différentes technologies et la modélisation des générateurs PV. Dans un second temps, les étages d'adaptation qui sont les convertisseurs électroniques de puissance seront abordés. Finalement, la poursuite du point de fonctionnement à puissance maximale que le générateur PV peut délivrer et qui est très affectée par la variation des variables environnementales (irradiation solaire et température de fonctionnement) utilise des algorithmes de tracking. Nous allons décrire les plus répandus dans la littérature et dans les systèmes et nous nous attarderons spécialement sur celui utilisé dans nos expérimentations.

I.2. Principe de la conversion photovoltaïque

Les cellules photovoltaïque (PV) ont pour rôle de convertir directement le rayonnement lumineux (rayonnement électromagnétique provenant du soleil ou autre) en électricité [Jena15, Pare19, Cucu17], c'est ce qui est appelé « l'effet photovoltaïque ». Généralement les cellules peuvent absorber jusqu'à 80% de l'énergie du rayonnement solaire, dont une partie est convertie en énergie électrique pour être utilisée et une partie perdue sous forme de chaleur [Cucu17, Pare19]. Le phénomène de conversion PV se réalise en trois phases physiques : l'absorption de la lumière dans le matériau, le transfert d'énergie des photons aux charges électriques et la collecte de ces charges [Giud16].

Une cellule PV est un dispositif optoélectronique constitué d'un matériau semi-conducteur qui converti directement l'énergie lumineuse en un courant électrique continu (DC) [Anka13, Sari19]. La circulation de ce courant DC donne naissance à un couple courant-tension aux bornes du semi-conducteur correspondant au phénomène physique appelé « effet photovoltaïque » [Walk00, Taps19]. La figure I.1 illustre la constitution d'une cellule photovoltaïque en silicium.

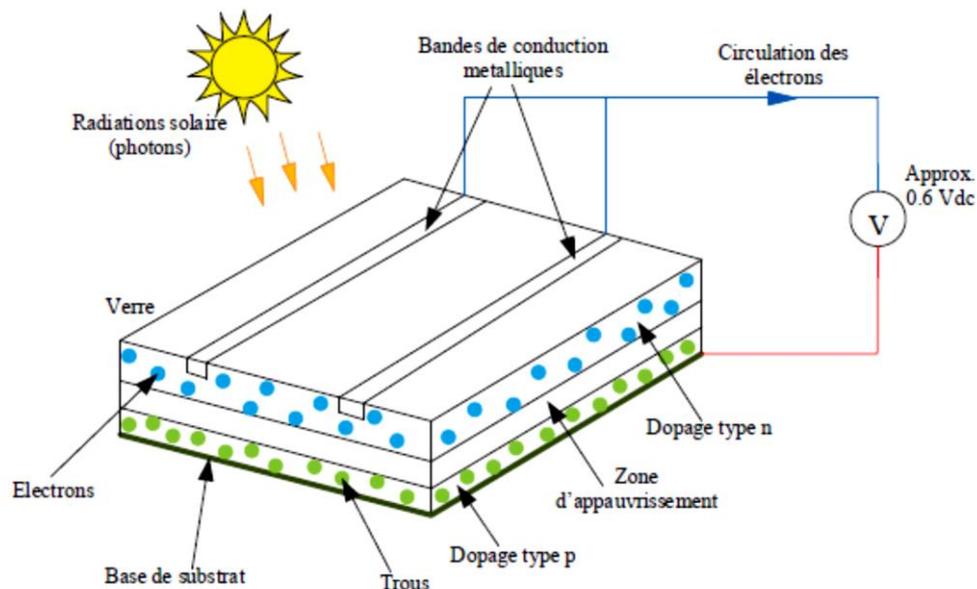


Fig. I.1. Principe d'une cellule photovoltaïque [Taps19]

Tout rayonnement électromagnétique, y compris le rayonnement solaire, est composé de particules énergétiques appelées photons. Un photon, caractérisé par sa longueur d'onde et donc son énergie sera soit transmis, soit réfléchi, soit absorbé, lorsqu'il rencontre un matériau.

Pour l'absorption de la lumière, une caractéristique importante du matériau est son gap. C'est l'écart entre le maximum de la bande de valence et le minimum de la bande de conduction d'un matériau. Dans un matériau PV à l'obscurité ou dans un semi-conducteur non excité électriquement, la bande de valence est présumée être entièrement occupée par des électrons et la bande de conduction entièrement vide. Il existe deux types de gap : le gap direct et le gap indirect.

- *Le gap direct* : Lorsque le minimum de la bande de conduction et le maximum de la bande de valence correspondent à la même valeur du vecteur d'onde, le gap est direct. Les transitions inter bandes s'effectuent verticalement, et sont donc radiatives. Le GaAs, le CdTe sont des exemples de matériaux à gap direct.

- *Le gap indirect* : dans ce type, la transition des extrema des bandes ne se fait pas verticalement mais de façon oblique donc les transitions électroniques sont non radiatives, puisqu'elles impliquent un changement du vecteur d'onde de l'électron. Le silicium cristallin est un exemple de semi-conducteur à gap indirect.

Lorsque l'énergie du photon est inférieure à celle du gap du matériau, la transition n'est pas possible et le photon n'est pas absorbé. L'interaction photon/semi-conducteur, dans le cas d'un photon suffisamment énergétique, se traduit par la génération d'une paire électron-trou qui modifie localement la conductivité du matériau. Il faut fournir une énergie au moins égale à celle du gap, qui est dépendant du matériau, pour faire monter un électron de la bande de valence à la bande de conduction et avoir création d'une paire électron-trou. De plus, l'énergie du photon supplémentaire à celle du gap, sera convertie en chaleur. On a donc création d'une paire d'électron-trou par photon au maximum. Il y a donc deux phénomènes qui limitent le rendement théorique [Giud16] :

- l'impossibilité de convertir des photons d'énergie inférieure au gap optique. Le gap optique représente l'énergie minimum requise à un électron de la bande de valence pour accéder à la bande de conduction.
- la perte de l'énergie du photon qui dépasse celle du gap optique.

Le fait de créer des paires électron-trou ne suffit pas car celles-ci peuvent se recombiner naturellement provoquant uniquement de l'énergie thermique. Il faut séparer les charges pour qu'elles puissent circuler sans se recombiner. Une solution est de créer un champ électrique dans le matériau. Pour cela, on dope une partie d'un semi-conducteur en atomes ayant un électron de valence supplémentaire par rapport à l'atome du semi-conducteur. Il y aura, dans cette partie de semi-conducteur, un excédent de charges négatives. Cette partie sera par conséquent donneuse d'électrons. On dit qu'elle est dopée de type N. Une autre partie de semi-conducteur sera dopée en atomes ayant un électron de valence de moins que l'atome du matériau semi-conducteur. Il y aura cette fois un excédent de charges positives. Le matériau deviendra

alors accepteur d'électrons. On dit qu'il est dopé de type P. La mise en contact de ces deux zones provoquera un champ électrique. On réalise ainsi ce que l'on appelle une jonction PN, c'est-à-dire une barrière de potentiel dans le semi-conducteur. Les types de barrières les plus communes sont l'homo-jonction (jonction PN dans le même semi-conducteur), l'hétérojonction (jonction PN entre deux matériaux semi-conducteurs différents) et les barrières Schottky (contact entre un métal et un semi-conducteur). La hauteur de la barrière de potentiel et l'intensité du champ électrique sont diminuées par polarisation de la jonction en direct qui permet le passage de porteurs. Une polarisation inverse augmentera la hauteur de barrière. Le fonctionnement de la jonction PN est illustré sur la figure I.2 ci-dessous :

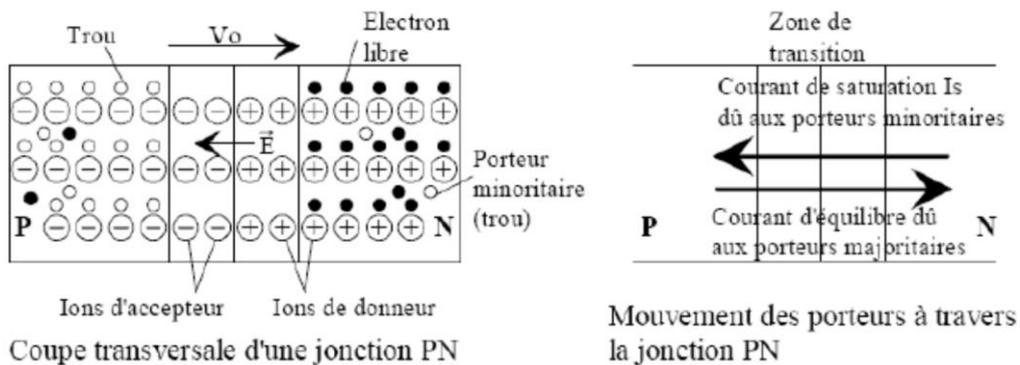


Fig. I.2. Fonctionnement de la jonction PN [Bouk11]

Dans la zone N ou P, les porteurs minoritaires qui atteignent la zone de charge d'espace sont envoyés par le champ électrique dans la zone P (pour les trous) ou dans la zone N (pour les électrons) où ils seront majoritaires. Il y aura un photo-courant de diffusion. Dans la zone de charge d'espace, les paires électrons-trous créées par les photons incidents sont dissociées par le champ électrique. Les électrons vont aller dans la région N et les trous vers la région P. Il en résulte donc un courant électrique dans la cellule PV et une différence de potentiel (de 0.6 à 0.8 Volt) supportée entre les bandes de conduction métalliques de la cellule, communément nommée tension à circuit ouvert (V_{co}) fortement dépendante de la température. Le courant maximal PV se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. On parle alors de courant de court-circuit (I_{cc}) dépendant fortement de l'irradiation solaire.

I.3. Technologies de la cellule PV

La filière silicium a connu initialement un grand essor grâce à l'expérience des industries du semi-conducteur qui utilisent depuis longtemps les propriétés électriques du silicium. Il est également intéressant de noter que l'industrie photovoltaïque, qui utilisait comme source de silicium les rejets de l'industrie électronique, doit maintenant faire face à une pénurie croissante du silicium de qualité solaire du fait de l'accroissement de la demande [Peti09]. Il existe un grand nombre de technologie de fabrication des cellules photovoltaïques, telles que les cellules issues des Wafers de silicium cristallin et les cellules obtenues directement par des procédés en couches minces.

La figure I.3 présente les étapes du processus de fabrication des cellules PVs qui sont :

Etape 1 : Elaboration du silicium de grade solaire à partir du silicium métallurgique qui lui-même, obtenu à partir de la silice. L'extraction du cristal de dioxyde de silicium, puis 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 [Bern09].

Etape 2 : Cristallisation de ce silicium solaire pour former des plaques (Wafers).

Etape 3 : Transformation de ce silicium cristallisé en composant actif pour devenir une cellule photovoltaïque. Le silicium est alors fusionné avec une petite quantité de dopant, normalement le bore qui est de type P puis coupe en fine tranches d'environ 300 μ m. Après la découpe et le nettoyage des impuretés des tranches, des impuretés de type N sont introduite 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 à 1000 ° C [Bern09].

Etape 4 : Assemblage des cellules photovoltaïques en module photovoltaïque.

Etape 5 : Groupement de plusieurs modules pour réaliser un système photovoltaïque intégré comprenant également une structure porteuse, des composants électroniques et électriques.

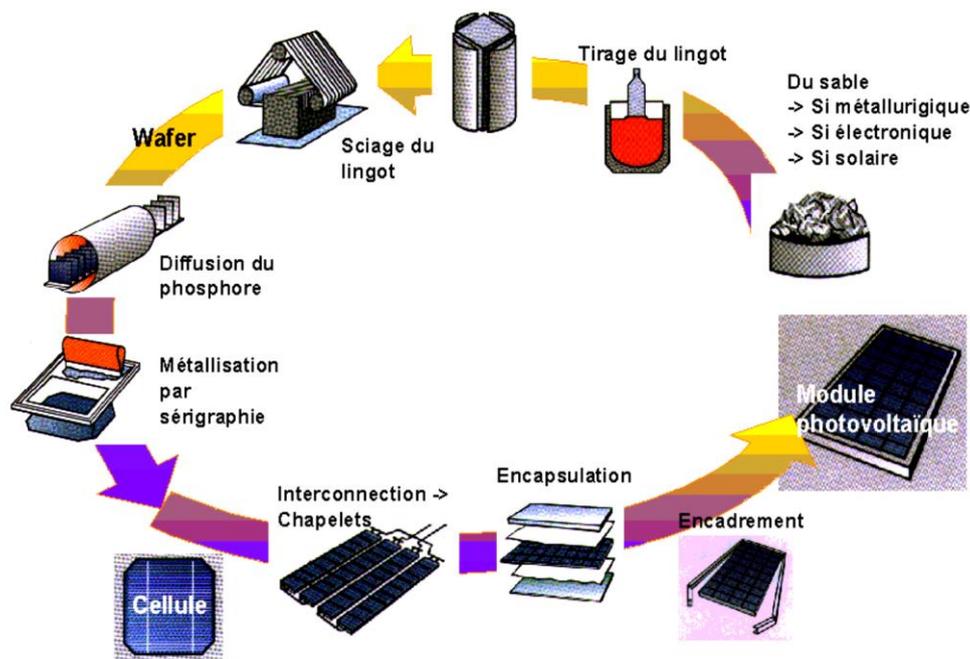


Fig. I.3. Processus de fabrication de module PV au silicium cristallin [EPSIC - D. Schneider]

Généralement, on distingue quatre générations de cellules photovoltaïques en fonction du développement technologique.

I.3.1. Cellules de première génération

Les cellules de la première génération sont basées sur une seule jonction PN et utilisent le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. La méthode de production basée sur les pastilles (wafers) de silicium est très énergivore et donc très coûteuse. Elle

nécessite par ailleurs un silicium d'une grande pureté. Cette technologie est subdivisée en deux sous filières : le silicium monocristallin et le silicium multi-cristallin, qui sont différenciés par leur procédé d'obtention du cristal.

L'industrie photovoltaïque actuelle est concentrée à plus de 90% sur l'utilisation du silicium comme matériau de base. Les cellules au silicium cristallin sont les plus répandues puisque le silicium possède un arrangement parfait des atomes, selon une structure ordonnée de type tétraédrique [Flèc07, Abad11].

Dans cette filière, le semi-conducteur présente en effet, différents avantages : il est le deuxième élément le plus fréquent de la croûte terrestre de 46% [Mam14], car facilement extrait à partir du sable ; il n'est pas toxique comme certains semi-conducteurs III-V [Aba11] ; il possède un oxyde naturel (SiO_2) présentant d'excellentes propriétés électroniques et il peut se doper facilement (avec des éléments de type N ou P comme par exemple le phosphore ou le bore). Son seul véritable inconvénient est un petit gap indirect à 1,1 eV qui entraîne une absorption du rayonnement plus faible qu'avec un matériau à grand gap qui serait de plus direct : pour absorber 90% du spectre solaire dans une plage de longueur d'onde autour du visible, il faudra utiliser une épaisseur de 100 μm pour le silicium. Les modules utilisant cette technologie couvrent plus de 80% du marché mondial [Adem19].

I.3.1.1. Cellules solaire monocristalline

La cellule au silicium monocristallin est constituée d'un seul cristal. Elle a un aspect uniforme, de couleur gris bleuté, ou noir. Son processus de fabrication est long, comme expliqué ci-dessus (§ I.3).

Un module PV monocristallin possède un rendement qui varie entre 16 et 26,7% [Gree19, Frau19]. Les avantages de cette technologie sont : une production des panneaux solaires presque optimale, et présente une bonne durée de vie. Il est à noter que la technologie silicium est quasiment arrivée à maturité et proche de son rendement maximum [Giud16].

Les inconvénients sont : un coût de production qui reste encore élevé, les panneaux sont donc chers à la vente, un rendement plus faible sous un faible éclaircissement et une baisse du rendement quand la température augmente par conséquent une production faible dans les régions chaudes [Mamb14, Boui19].

I.3.1.2. Cellules solaire multi-cristalline

La cellule multi-cristalline se compose de plusieurs cristaux assemblés présentant l'aspect d'une mosaïque. Les cellules en silicium multi-cristallin sont moins coûteuses que celles en silicium monocristallin car les processus de préparation des cellules sont moins stricts. L'avantage de ces cellules par rapport au silicium monocristallin est qu'elles produisent peu de déchets de coupe et qu'elles nécessitent de 2 à 3 fois moins d'énergie pour leur fabrication. Les cellules multi cristallines peuvent être fabriquées selon deux manières différentes [Zega12, Allo17].

La première façon, consiste à fabriquer des rubans de silicium à partir de poudre de ce dernier. Le procédé est relativement rapide donc son coût est moins élevé. Cependant des contraintes se forment lors de refroidissement, la matière se disloque et les cristaux sont alors arrangés de manière aléatoire.

Tandis que la seconde méthode et qui la plus répandue, elle consiste à refondre des chutes de silicium monocristallin récupéré lors de l'équarrissage des wafers, nécessite moins d'énergie que pour la production de silicium monocristallin d'où la réduction de son prix de coût. Une fois refroidis, les lingots sont découpés en tranches de quelques centaines de micromètres d'épaisseur, formés de cristaux monocristallins arrangés de manière non uniforme. Actuellement c'est la technologie qui offre le meilleur rapport qualité/prix et la plus utilisée [Abad11]. Elle a un rendement inférieur par rapport aux cellules monocristallines de l'ordre de 13 à 22,3 % [Gree19, Frau19] et une bonne durée de vie.

I.3.2. Cellules de deuxième génération

Les couches minces (*Thin film*) constituent la seconde génération de technologie photovoltaïque. La couche du semi-conducteur est directement déposée sur un substrat, par exemple le verre. La production de ce type de cellule est moins coûteuse que celui de la première génération puisqu'elle consomme moins de semi-conducteur et ne nécessite pas de passer par l'étape de transformation du silicium en pastille. L'intérêt de la technologie couche mince vient de la faible quantité de matériaux nécessaire à la fabrication d'une cellule comparativement aux cellules classiques ou silicium cristalline qui sont constituées de couche épaisse [Mamb14]. L'inconvénient de ces cellules est leur faible rendement de 6 à 9 % en version commerciale et 14% en laboratoire [Frau19]. Dans cette technologie nous distinguons:

I.3.2.1. Cellules au silicium amorphe (a-Si)

L'organisation des atomes n'est plus régulière comme dans un cristal et l'ordre cristallin n'est maintenu qu'à courte distance. Le silicium amorphe (noté a-Si) peut être directement déposé sur un substrat de verre d'une couche d'oxyde transparente conductrice d'une épaisseur de 0,5 μ m (TCO : *Transparent Conductive Oxide*). Cette étape est suivie par les étapes de dépôt suivantes : une couche d'a-Si de type N, puis une couche a-Si semi-isolante (1 μ m au total) et enfin une couche de a-Si dopée P, une dernière couche métallique arrière à base d'argent assure la connectique. 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 qui permet toutefois d'abaisser significativement les coûts de productions [Boui19].

Les modules au silicium amorphe auront un bon avenir car ils peuvent être souples et ont une meilleure production sous une faible lumière. Le silicium amorphe possède un rendement divisé par deux par rapport à celui du cristallin ce qui nécessite plus de surface pour la même puissance installée. Le silicium amorphe présente plus de 8 % du marché mondial. L'utilisation du silicium amorphe a deux inconvénients : le premier est le rendement de conversion faible par rapport aux cellules de mono et multi-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 [Bern09].

I.3.2.2. Cellules au tellure de cadmium (CdTe)

Ce matériau est intéressant du fait de son gap optique 1.45 eV et de sa forte absorption qui permet en moins de 2 μm d'épaisseur d'absorber la quasi-totalité du spectre visible. La technologie à base de CdTe présente des rendements en dessous du cristallin, de l'ordre de 7 à 9 % en industrie (21.0%, record cellule en laboratoire [Gree19, Frau19]) mais bénéficie d'un faible coût à la production. Sa capacité d'absorption de la lumière et son coefficient thermique avantageux lui permettent d'être en adéquation presque parfaite avec le spectre solaire.

Son principal inconvénient est sans nul doute la limitation naturelle de la quantité de tellure sur terre qui oblige la recherche à réduire au maximum son épaisseur, qui avoisine aujourd'hui 3 μm . De plus, le cadmium est toxique [Boui19]. Il faut tout de même préciser que celui-ci est dangereux seulement lors de la fabrication et qu'un module PV ne contient que très peu de cadmium : un module CdTe de 60W (~12 kg) contient environ 2g de Cd. Elles sont encore au stade expérimental, et sont élaborés à bas coût. Mais, malheureusement elles contiennent du cadmium connu par sa toxicité et déjà interdit dans certains pays [Peti09].

I.3.2.3. Cellules au sélénure de cuivre d'indium (CIS)

Les cellules multi-jonctions ont une meilleure absorption du spectre solaire que les cellules à une jonction et donc présentent des rendements plus élevés. Les cellules solaires en couches minces à base de CIS sont des cellules à hétérojonction. On peut associer une quantité limitée de Gallium (CIGS) pour améliorer les propriétés d'absorption. Ce type de cellules PVs présente le plus fort coefficient d'absorption des semi-conducteurs PV grâce à son gap direct : 2 μm d'épaisseur sont suffisants par rapport à 200 μm pour l'homo-jonction de Si [Kodi2010].

Sa stabilité, son haut rendement par rapport aux autres couches minces (13% pour certains modules commerciaux) ainsi que son coût de fabrication relativement peu onéreux permettent à cette technologie de croître rapidement [Mamb14]. La technologie à base de CIGS présente des rendements de l'ordre de 23,4 %, record cellule en laboratoire [Gree19, Frau19].

I.3.3. Cellules de troisième génération

La troisième génération vise à obtenir des dispositifs à haut rendement, mais utilisent encore des procédés de dépôt de couches minces de deuxième génération. Les cellules de la troisième génération sont des cellules organiques et plastiques, principalement encore au stade de la recherche malgré quelques transferts technologiques et réalisations commerciales. Elles comprennent la voie des cellules humides dites « Grätzel » ou la voie des polymères organiques dites aussi cellules plastiques. Il existe d'autres cellules, dites de troisième génération, les cellules à colorants qui reposent sur des macromolécules et des nanoparticules dont les procédés de fabrication sont bien moins consommateurs d'énergie et, potentiellement, d'un coût de

revient plus faible [Mamb14]. Malheureusement pour l'industrie PV, les cellules de la troisième génération manquent de stabilité dans le temps, ce qui entraîne une durée de vie, lorsqu'elles sont exposées au soleil, trop courte pour les applications PV [Mamb14].

I.3.3.1. Cellules organiques

Les matériaux organiques, moléculaires ou polymériques, à base de carbone, d'hydrogène et d'azote, sont particulièrement intéressants en termes d'abondance, de coût, de poids et de mise en œuvre [Peti09]. La cellule organique atteint un rendement de 11,2% [Gree19]. L'intérêt des cellules organiques vient du fait que, contrairement aux cellules à base de matériaux inorganiques, elles offrent l'avantage de pouvoir être déposés en grande surface à grande vitesse, comme ces cellules peuvent facilement se développer sur matériaux souples, leur flexibilité quasi naturelle est également un atout [Peti09, Bail10].

Les cellules solaires organiques avec leurs faibles coûts de matière première, leurs faibles besoins énergétiques nécessaires à leur production et leurs capacités à être fabriquées à grande échelle sont des candidates sérieuses à fort potentiel de développement photovoltaïque à long terme [Peti09]. Le coût de ces cellules organiques est inférieur à celui des cellules à colorants et elles peuvent même être biodégradables [Peti09].

I.3.3.2. Cellules à colorants

Ce sont une autre classe de cellules à couches mince basé sur des colorants organiques. Les cellules solaires à colorants sont très minces, légers et peuvent être traités à basse température sur des substrats non coûteux comme le verre, le plastique et les feuilles métalliques. Le traitement à faible coût et les matériaux peu coûteux rendent ces cellules très rentables.

I.3.3.3. Cellules à multi jonctions

Une autre catégorie de cellules appartenant à la troisième génération, basées cette fois-ci sur une logique de très hauts rendements, sont les cellules à multi jonctions qui peuvent atteindre un rendement de plus de 40% en laboratoire et une limite théorique de 81% [Mamb14]. Ces cellules sont en revanche très onéreuses et ne sont utilisées, pour le moment, que dans le domaine du spatial ou du solaire à concentration. Les cellules de troisième génération sont, pour l'instant, soit au stade de recherche, soit appliquées pour des domaines autres que le solaire PV terrestre (sans concentration) [Mamb14]. Elles n'entrent donc par conséquent pas dans le cadre de cette thèse et c'est pour cette raison que nous ne détaillerons pas ces technologies.

Les cellules PV multi-jonctions à base d'associations de matériaux semi-conducteurs III-V (GaAs, AlGaAs, InGaAs, InGaN, etc) ont ainsi été mises au point depuis les années 60 présentant des rendements très élevés supérieurs parfois à 40% [Peti09, Giud16]. Les semi-conducteurs III-V sont des matériaux composés d'un ou plusieurs éléments de la colonne III et de la colonne V du tableau périodique de Mendeleïev, tels que l'arséniure de gallium, arséniure

d'indium, nitrure de gallium, antimoniure de gallium ou des alliages ternaires tels que $In_xGa_{(1-x)}As$. Ils présentent généralement une haute mobilité électronique et une bande interdite directe. Après le Silicium, ce sont les deuxièmes matériaux semi-conducteurs les plus utilisés dans l'industrie des semi-conducteurs. Elles ne sont pas connues du grand public à cause de leur coût de fabrication, de loin, les plus élevés actuellement (fabrication sous ultra vide, croissance très lente, problème de casses et de défauts aux interfaces). Le développement des cellules à haut rendement a été motivé en priorité par les applications spatiales. En effet, dans ce domaine, le critère principal n'est pas le prix par watt-crête (W_c) mais plutôt le nombre de watts par kilogramme (W_c/kg) [Peti09].

I.3.4. Cellules de quatrième génération

La quatrième génération des cellules solaires est orientée vers un modèle de cellule photovoltaïques à la fois organiques et inorganiques (cellules hybrides), et des cellules nommées pérovskites [Allo17, Kuma17].

I.3.4.1. Cellules hybrides

Les cellules solaires hybrides organiques-inorganiques utilisent une mobilité électronique élevée de nano cristaux inorganiques et une aptitude à l'absorption et à la solution à large spectre de polymères conjugués. De plus, le spectre d'absorption combiné des semi-conducteurs organiques-inorganiques dans le composite améliore la récolte de photons. Les niveaux d'énergie relatifs des matériaux donneur / accepteur dans les cellules solaires hybrides sont d'une grande importance car le courant photonique des cellules solaires dépend de l'alignement du niveau d'énergie à la fois aux interfaces donneur-accepteur et électrode.

Par conséquent, dans des cellules solaires hybrides, la sélection de semi-conducteurs organiques-inorganiques avec des électrodes appropriées est très cruciale. Pour traiter les problèmes de séparation des charges et de transport dans les cellules solaires hybrides organiques-inorganiques, certains des nanomatériaux semi-conducteur inorganiques importants qui ont été utilisés comme accepteurs d'électrons sont CdSe, CdTe, ZnO, CdS, ZnS, TiO₂, PbS et PbSe [Allo17].

I.3.4.2. Cellules pérovskites

La cellule solaire de la pérovskite est une technologie récemment émergée, qui a montré un grand potentiel et promet d'être très rentable et plus efficace que toute autre technologie de cellules solaires à couche mince connue jusqu'à présent, elle atteint en 2019 les 20,9% de rendement [Gree19] Ces dispositifs peuvent être facilement préparés sur des substrats flexibles à température ambiante avec le procédé de revêtement par centrifugation à petite échelle et par l'impression à grande échelle.

On constate que seules les cellules solaires pérovskite affichent des rendements très prometteurs qui dépassent les autres types. A noter aussi que les technologies des cellules

solaires à colorants et les cellules organiques ont regagné la technologie silicium amorphe à partir de 2012 en matière de rendement et servent comme matériaux alternatifs dans le futur proche [Allo17].

I.4. Rendements de différentes technologies

La figure I.4 représente une comparaison des rendements de cellules et modules photovoltaïques de technologies distinctes :

- La technologie cristalline (mono et multi) domine les autres technologies, elle reste toujours en premier lieu par le meilleurs rendement, les technologies les plus présentes dans le marché économique, le multi-cristallin a atteint la barre de 22.3 % et le monocristallin a atteint 26,7 %, mais le prix élevé limite l'utilisation de cette technologie.
- Un autre domaine de recherche sur le solaire, plus récent, concerne les cellules photovoltaïques à base de pérovskites. Il s'agit d'un type de cellule photovoltaïque qui comprend un élément chimique ayant une structure de pérovskite, le plus souvent un hybride organique-inorganique de plomb ou un halogénure d'étain, dans sa couche active. C'est une nouvelle technologie pleine de promesses, mais elle se heurte également à des verrous très importants, comme leur mauvaise résistance à l'eau. Actuellement le rendement record obtenu en laboratoire est de 20.9 % [Gree19, Boui19].

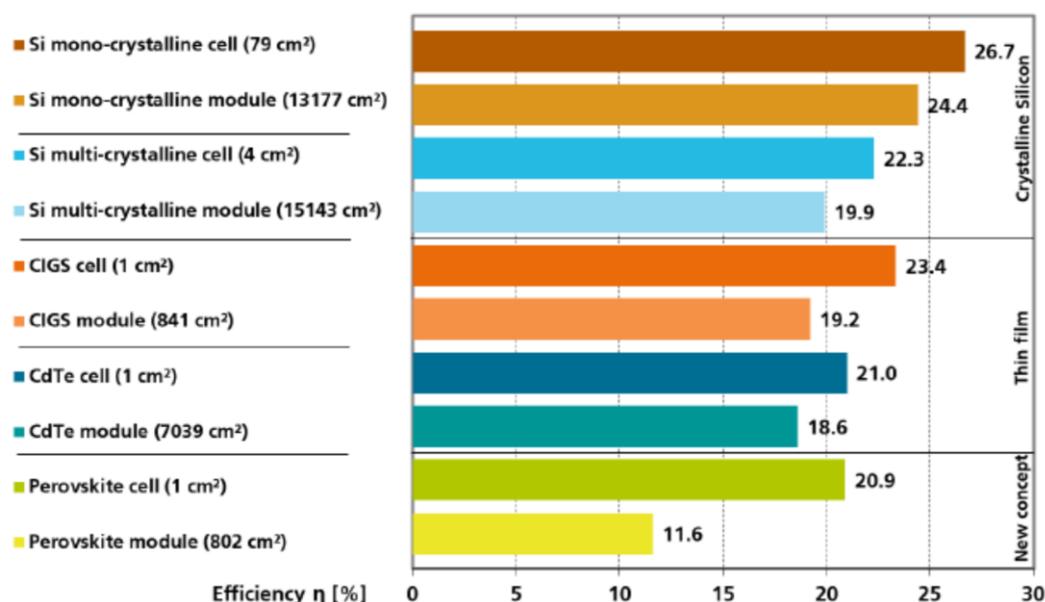


Fig. I.4. Comparaison des rendements de différentes technologies de cellules et modules photovoltaïque [Frau19]

La Figure I.5 représente les records mondiaux de rendement de conversion pour les cellules solaires de différentes technologies au fil des années. Les codes couleurs représentent les différentes technologies. Le classement des rendements montre que les cellules multi-jonctions et simple-jonction ont les rendements les plus élevés suivi des cellules à base de

silicium cristallin, des cellules en couches minces et des cellules émergentes [Boui19, Gree19]. Le rendement maximal des cellules multi-jonctions à base de III-V approche les 46% de rendement sous concentration [Boui19, Gree19].

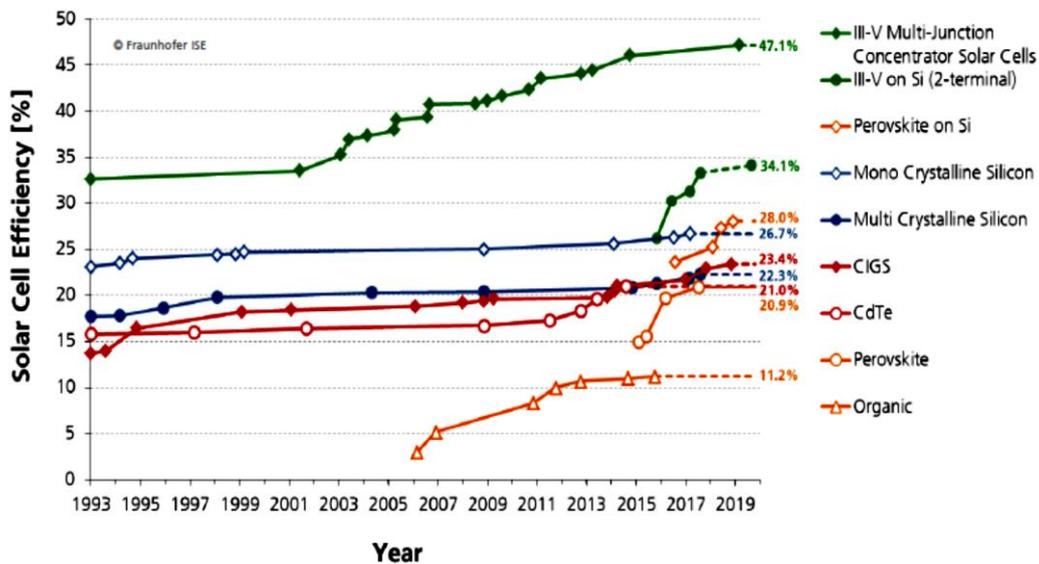


Fig. I.5. Développement des rendements de cellules photovoltaïque en laboratoires [Frau19]

Dans cette thèse, nous avons utilisé comme technologies : module monocristallin, module multi-cristallin et module amorphe, et qui sont par ailleurs disponible dans le Laboratoire de recherche MOPS à l'Université de Lorraine, Metz, France.

I.5. Modélisation d'une cellule PV

I.5.1. Courbes et grandeurs caractéristiques d'une cellule PV

La courbe caractéristique d'une cellule photovoltaïque correspond bien dans le principe à une photodiode. Cependant, pour la cellule PV le principe du générateur est sélectionné comme le schématise la figure I.6.

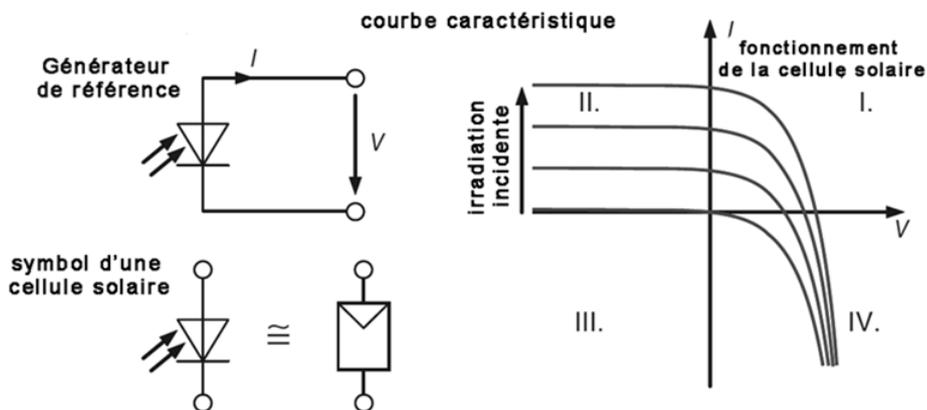


Fig. I.6. Courbe caractéristique d'une cellule PV en mode générateur

Comparativement à une photodiode, le sens de la tension est conservé par contre celui du courant est inversé pour préserver la convention générateur. La production d'énergie aura lieu dans le premier quadrant et par suite la majorité des courbes caractéristiques de la cellule PV sont représentées dans ce même quadrant. Le symbole d'équivalence utilisé en figure I.6 pour une cellule PV est devenu une norme.

Une caractéristique typique d'une cellule PV est présentée en figure I.7 avec son schéma électrique simplifié inspiré du principe de la photodiode. Ce circuit équivalent décrit approximativement le comportement d'une cellule PV réelle.

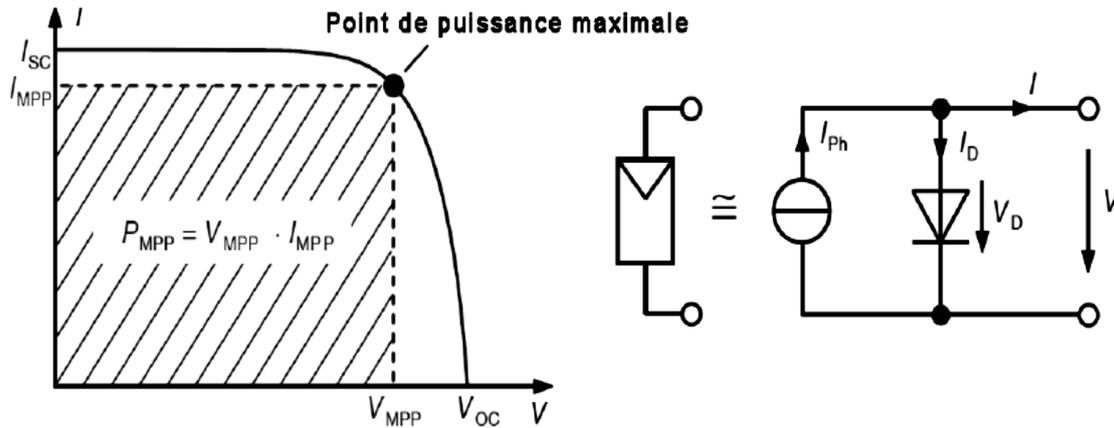


Fig. I.7. Caractéristique I(V) d'une cellule PV à gauche et son schéma équivalent à droite [Zega12]

Par similarité à une photodiode et à partir du schéma équivalent consigné en figure I.7, la jonction PN dans l'obscurité suit la relation caractéristique suivante [Ndoy09] :

$$I_D = I_s \left[\exp\left(\frac{V}{m \cdot V_t}\right) - 1 \right] \quad (I.1)$$

Le courant délivré sur une charge par une cellule photovoltaïque éclairée s'écrit sous la forme de l'équation I.2 :

$$I = I_{ph} - I_D \quad (I.2)$$

Soit :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V}{m \cdot V_t}\right) - 1 \right] \quad (I.3)$$

Avec

I_{ph} : Photo-courant (A)

I_s : Courant de saturation de la diode (A)

m : Facteur d'idéalité compris entre 1 et 2

V : Tension aux bornes de la cellule PV (V)

I : Courant produit par cette dernière (A)

V_t : Tension thermique de la diode (V) ; $V_t = kT_c/q$.

k : Constante de Boltzmann ($J.K^{-1}$),

q : Charge de l'électron (C),

T_c : Température absolue de la cellule ($^{\circ}C$),

I_D : Courant d'obscurité (A).

On remarque sur la courbe caractéristique en figure I.6 plusieurs points marquants qui permettent de mieux décrire une cellule solaire.

I.5.1.1. Courant de court-circuit

Le courant de court-circuit d'une cellule PV et celui quand elle est court-circuitée donnant ainsi une tension nulle $V = 0$. Par substitution $V = 0$ dans l'équation I.3, on trouve :

$$I_{cc} = I_{ph} \quad (I.4)$$

Il revient à conclure que le courant de court-circuit est en réalité le photo courant. Et du moment que ce dernier est proportionnel au niveau de l'irradiation solaire, le courant de court-circuit l'est aussi.

I.5.1.2. Tension à circuit ouvert

Le second cas extrême se produit lorsque le courant produit s'annule donnant naissance à une tension à circuit ouvert. Cette tension s'obtient par la résolution de l'équation I.3 avec V comme variable et pour un courant I nulle, ce qui donne lieu à :

$$V_{co} = V(I = 0) = m \cdot V_t \cdot \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1\right) \quad (I.5)$$

Cependant, avec des petits courants la valeur 1 devra être ignorée devant le rapport I_{cc}/I_s dans le logarithme et l'équation I.5 sera simplifiée à :

$$V_{co} = V(I = 0) = m \cdot V_t \cdot \ln\left(\frac{I_{cc}}{I_s}\right) \quad (I.6)$$

Cette formule montre clairement que la tension à circuit ouvert est moins dépendante de la variation d'irradiation solaire par rapport au courant de court-circuit d'une cellule PV, car la tension V_{co} varie uniquement avec le logarithme népérien de l'énergie incidente E qui n'est autre qu'une image du courant de court-circuit I_{cc} .

I.5.1.3. Point de puissance maximale

La cellule PV produit des puissances différentes qui dépendent du point de fonctionnement réel dans lequel elle travaille. Seul un point dans lequel la puissance maximale est fournie à la charge et qui est appelé le Point de Puissance Maximale (PPM) ou Maximum Power Point (MPP) en Anglais. Et comme à chaque point de fonctionnement sur la caractéristique I(V), la puissance fournie correspond à la surface ($V \cdot I$), la surface devant être maximale dans le cas du PPM. Sur la figure I.8, au PPM correspond le courant I_{MPP} et la tension V_{MPP} .

Les coordonnées de ce point peuvent être estimés en fonction des valeurs du courant (I_{CC}) et la tension (V_{CO}) de la manière suivante [Allo17] :

$$0,75 \times V_{CO} \leq V_{MPP} \leq 0,9 \times V_{CO}$$

$$0,85 \times I_{CC} \leq I_{MPP} \leq 0,95 \times I_{CC}$$

I.5.1.4. Facteur de forme

Le facteur de forme (fill factor) (FF) est défini par la relation entre la puissance du PPM et le produit de la tension à circuit ouvert par le courant de court-circuit comme illustré sur la figure I.8.

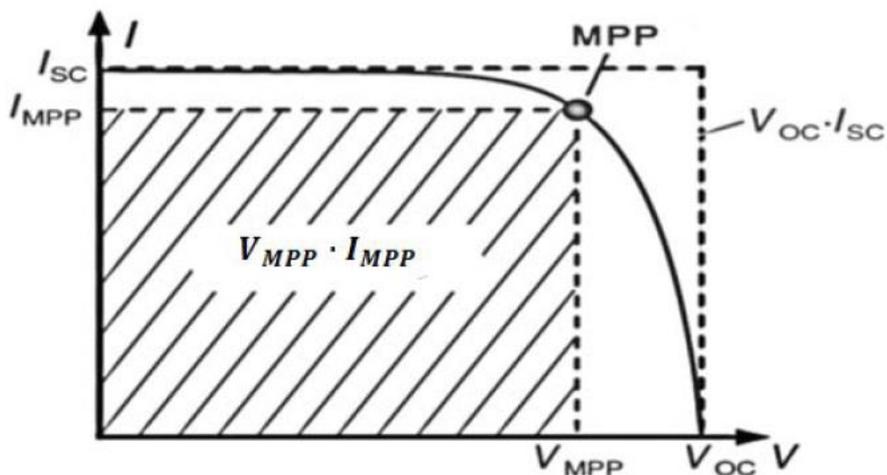


Fig. I.8. Facteur de forme, rapport de la surface hachurée à la surface non hachurée [Allo17]

La puissance maximale que peut délivrer une cellule PV sous une illumination et une température donnée est influencée par le facteur FF conformément à l'équation suivante :

$$P_{MPP} = V_{MPP} \cdot I_{MPP} = V_{CO} \cdot I_{CC} \cdot FF \quad (I.7)$$

La puissance maximale, la tension à circuit ouvert et le courant de court-circuit (P_{MPP}, V_{CO}, I_{CC}) respectivement, sont des paramètres spécifiés par le fabricant. Ces valeurs sont

données pour un ensoleillement, une température de fonctionnement et un air masse donné (AM1.5).

I.5.2. Modèle mathématique

Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Plusieurs modèles électriques ont été proposés dans la littérature pour représenter la cellule PV [Jena15], dont le plus utilisé est le modèle à une diode et 5 paramètres tels que représenté par la figure ci-dessous :

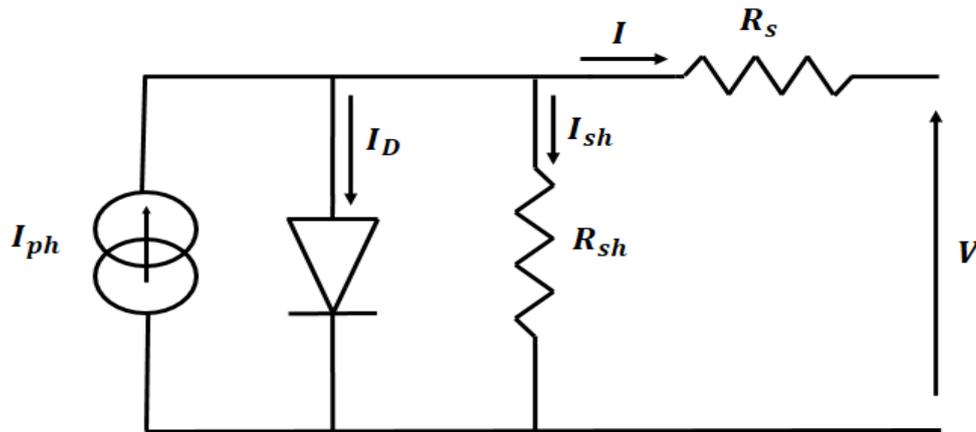


Fig. I.9. Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque réelle

Ce modèle tient compte de la résistance série R_s et de la résistance shunt R_{sh} [Cher12, Kess15] comme le montre la figure I.9. Le comportement de cette cellule est décrit par l'équation suivante :

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (I.8)$$

En remplaçant les différents courants par leurs formules, on obtient l'équation caractéristique de la cellule :

$$I = I_{ph} - I_s \left[\exp\left(\frac{V + R_s I}{m N_s V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (I.9)$$

- La résistance série R_s : modélise les pertes ohmiques dans le matériau et dans les contacts métalliques.
- La résistance shunt R_{sh} : modélise les courants parasites entre le dessus et le dessous de la cellule, par le bord en particulier et à l'intérieur du matériau par des inhomogénéités ou des impuretés.

L'association de plusieurs cellules PV en série N_s et en parallèle N_p permet d'adapter théoriquement la production d'énergie photovoltaïque à la demande. Ces associations constituent un générateur photovoltaïque (GPV) avec des caractéristiques courant-tension $I(V)$ spécifiques, non-linéaires et présentant des points de puissance maximale (PPM) dépendant du

niveau d'illumination et de la température de la cellule. Afin de pouvoir utiliser cette énergie, la connexion à une charge est nécessaire. Il en résulte par conséquent un point de fonctionnement correspondant au point d'intersection des caractéristiques électriques $I(V)$ du GPV et de celle de la charge.

I.5.3. Protection d'un GPV

Pour garantir une durée de vie importante d'une installation photovoltaïque destinée à produire de l'énergie électrique sur des années, des protections électriques doivent être ajoutées aux modules commerciaux afin d'éviter des pannes destructrices liées à l'association de cellules en série et de panneaux en parallèles. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés dans les installations actuelles [Caba08] comme la montre la figure ci-dessous :

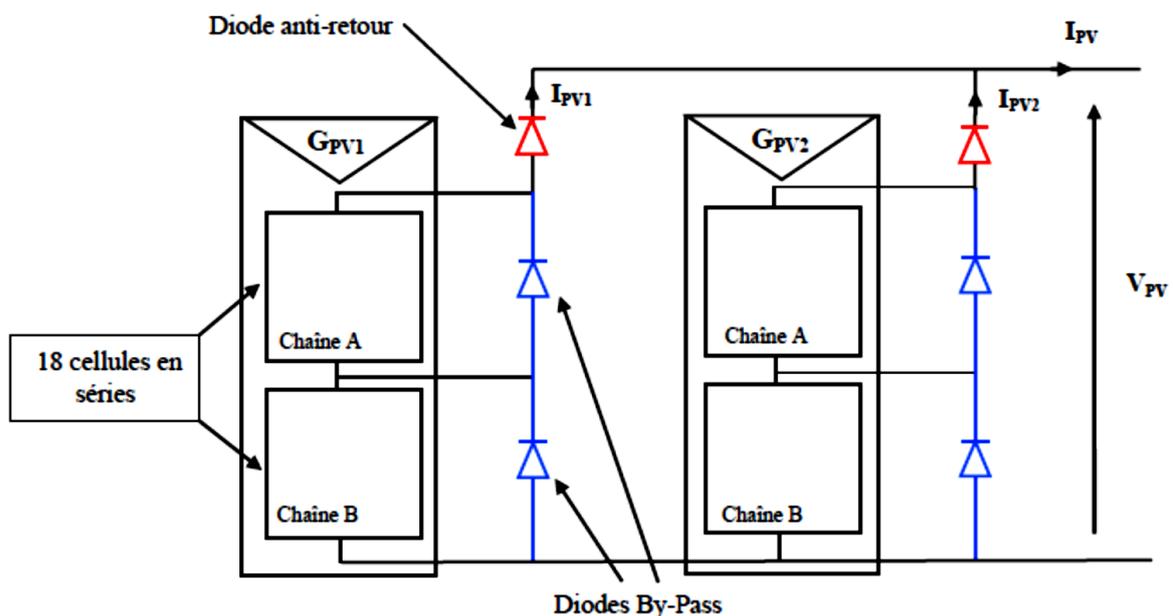


Fig. I.10. Association de deux modules en parallèles

- La diode anti-retour empêchant un courant négatif dans les GPV. Ce phénomène peut apparaître lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle, ou bien quand une charge en connexion directe peut basculer du mode récepteur au mode générateur, par exemple une batterie durant la nuit.
- Les diodes by-pass, ou de dérivation, peuvent isoler un sous-réseau de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène ou conditions météorologiques défavorable évitant ainsi l'apparition de points chauds (hot spot heating) et forte probablement la destruction des cellules mal éclairées. La mise en conduction de ces diodes affecte la caractéristique de sortie du générateur par la perte d'une partie de la production d'énergie.

I.6. Influence des variations climatiques sur la cellule photovoltaïque

I.6.1. Variations de l'énergie incidente

La variation d'énergie incidente (ensoleillement) entraîne une variation du courant proportionnel à cette dernière et une variation de la tension relativement faible. La figure I.11 montre les résultats de simulation sous l'environnement MATLAB/Simulink de l'influence d'une variation d'énergie incidente sur les caractéristiques P(V) d'un GPV. Les simulations sont faites pour une température T de surface fixée à 25 °C.

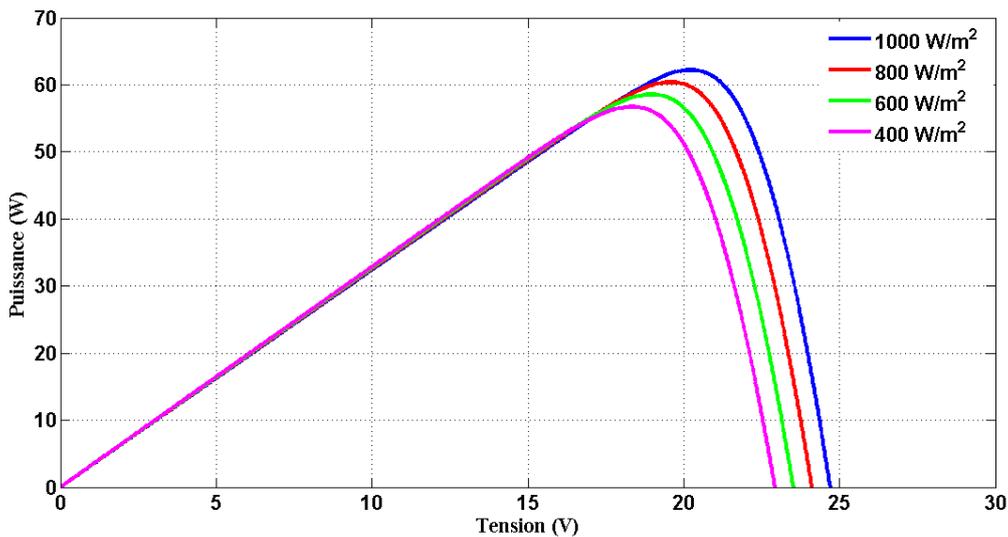


Fig. I.11. Modèles de simulation de l'influence de variation d'irradiation sur les caractéristiques P(V)

Le courant de court-circuit est directement proportionnel au rayonnement incident. Par contre, la tension à circuit ouvert augmente rapidement pour de faibles niveaux d'éclairement, puis lentement pour des niveaux plus élevés.

I.6.2. Variations de la température

Puisque l'énergie de la bande gap décroît avec l'augmentation de la température, plus de photons ont assez d'énergie pour créer des paires électrons-trous. Par conséquent, le courant de court-circuit augmente légèrement I_{cc} d'environ 0,07 %/°K pour les cellules en silicium [Zega12]. La tension à circuit ouvert V_{co} baisse avec la hausse de température. Cette baisse est aux alentours de 0,4%/°. La puissance chute de 0,5%/°K et ce toujours pour des cellules PV en silicium [Zega12].

Pour étudier l'influence des variations de la température sur les caractéristiques P(V), nous avons fait varier la température pour un énergie incidente fixé à 1000 W/m^2 . Les résultats de simulations sous l'environnement MATLAB/Simulink sont consignés en figure I.12.

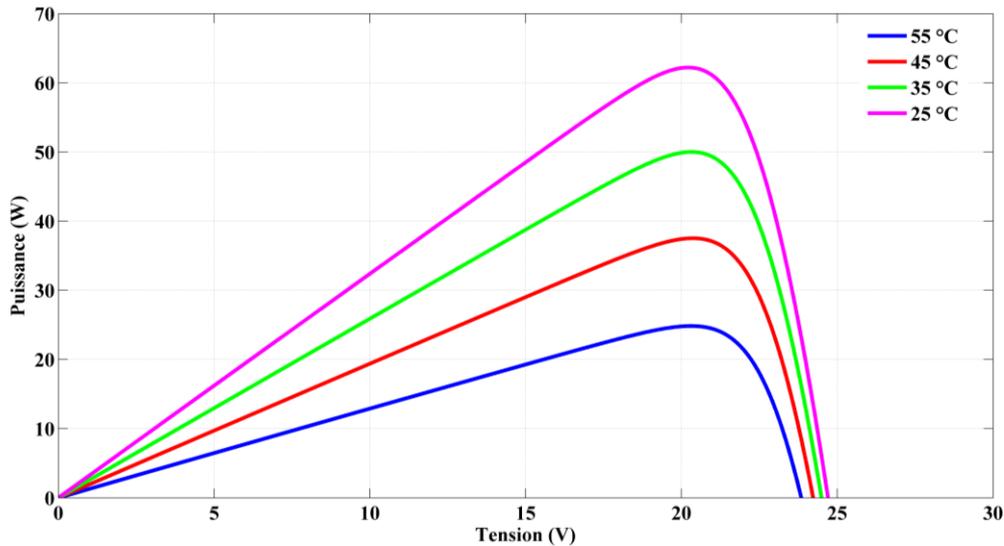


Fig. I.12 : Caractéristique P(V) pour différents températures, simulés sous l'environnement MATLAB/Simulink

L'influence d'une variation de température sur le courant de court-circuit reste insignifiante mais le point de puissance se déplace à gauche dans la courbe caractéristique I(V) et sa puissance chute avec une hausse de température.

La connaissance de l'influence d'une variation de température sur la puissance est nécessaire dans les études du module PV. Comme dans ce cas la tension à circuit ouvert est fortement dégradée que de légère hausse du courant de court-circuit, la puissance du PPM se dégrade aussi.

I.7. Conversion énergétique d'un système PV

La cellule photovoltaïque, et par conséquent le module PV, présente des caractéristiques fortement non linéaires qui dispose d'un point de puissance maximale PPM, où l'on exploite au mieux le potentiel du PV. Ce point est appelé le point de fonctionnement optimum et est défini par l'intersection de la caractéristique du PV avec celle de la charge. Le PPM est atteint lorsqu'on intercale un convertisseur entre le GPV et la charge [Sour12], c'est le phénomène d'adaptation d'impédance qui obéit au théorème de transfert de la puissance maximale.

L'utilisation optimale consiste alors à ce que la charge conserve à chaque instant sa valeur optimale lorsque les conditions varient. Dans le cas général, il y a peu de chance pour que la charge réelle suive naturellement ces variations. Il y a donc lieu d'effectuer en permanence l'adaptation d'impédance nécessaire en insérant, entre le générateur et la charge électrique, un dispositif adaptateur d'impédance R_{opt} .

La chaîne de conversion photovoltaïque comporte l'élément principal qui est le générateur photovoltaïque GPV en plus une charge et un convertisseur de puissance DC/DC ou DC/AC tout selon la configuration choisie. Il existe deux modes de conversion PV : le premier mode est une connexion directe et le deuxième une connexion via un étage d'adaptation.

I.7.1. Conversion directe

Dans ce mode de connexion, le générateur ou module PV est directement branché sur la charge avec une diode anti retour permettant d'isoler toute possibilité d'inversion du sens du flux énergétique résultant d'un ombrage ou changement rapide des conditions météorologiques d'éclairement et de température, ce qui implique des variations de la tension au borne de la charge et par conséquent, la puissance maximale du générateur PV (GPV).

En ce mode, le point de fonctionnement est imposé par la charge et peut ne pas être le PPM. Cette configuration est destinée à des installations autonomes où dans les sites isolés, là où le système nécessite une tension fixe. La figure I.13 représente le schéma de conversion directe liant le GPV à la charge. L'inconvénient de ce type de connexion est qu'elle n'offre pas la possibilité de contrôler ou limiter la tension fournie à la charge.

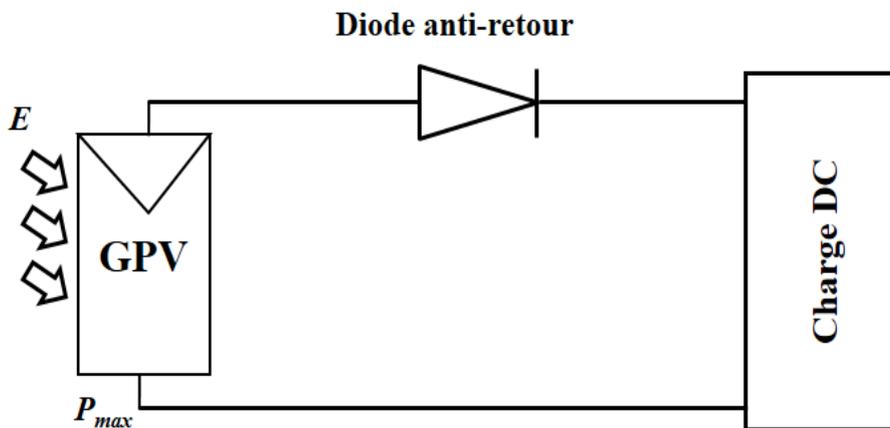


Fig. I.13. Conversion directe entre GPV-Charge

I.7.2. Conversion via étage d'adaptation

Le deuxième mode est une conversion indirecte via un étage d'adaptation. La figure I.14 présente le schéma de principe d'un module photovoltaïque doté d'un étage d'adaptation DC-DC reliant le GPV à la charge. Cette structure correspond à un système plus communément appelé système autonome. Il permet le plus souvent d'alimenter une batterie servant le stockage d'énergie ou une charge qui ne supporte pas les fluctuations de tension (ballast,...).

Cet étage d'adaptation dispose d'une commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) qui lui permet de rechercher le PPM que peut fournir un panneau solaire photovoltaïque. L'algorithme de recherche MPPT peut être plus ou moins complexe en fonction du type d'implantation choisi et des performances recherchées. Cependant au final, tous les algorithmes performants doivent jouer sur la variation du rapport cyclique du convertisseur de puissance associé.

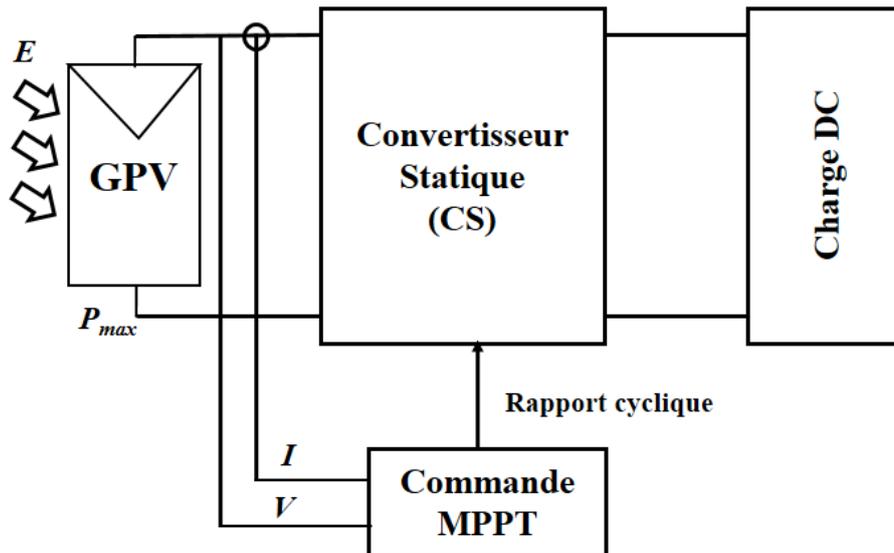


Fig. I.14. Connexion GPV- Charge DC via un étage d'adaptation

Dans ce qui suit, en expliquant en détail chaque partie de l'étage d'adaptation utilisé pour réaliser ce travail de thèse, ainsi ce qu'il existe dans la littérature. On s'intéresse tout d'abord aux convertisseurs DC/DC avec ces différents types et caractéristiques, puis aux algorithmes MPPT définissant le suivi du point de puissance maximale avec le choix de l'algorithme de l'étude et au bus haute tension continue (HVDC) et ces principales caractéristiques.

I.8. Convertisseur d'énergie DC/DC

Le convertisseur DC/DC est utilisé pour réguler la tension de sortie. La tension de référence (consigne) est alors constante ou imposée par un algorithme de commande.

I.8.1. Convertisseur Boost

Comme déjà vu aux paragraphes ci-dessus, un GPV présente des caractéristiques $I(V)$ non linéaires et qui admettent un seul point de fonctionnement optimal dans les conditions homogènes d'éclairement et de température. Une adaptation d'impédance s'impose et cela peut se faire naturellement par un couplage direct d'une charge adaptée ou en insérant entre le GPV et la charge électrique un dispositif électronique. Ce dispositif n'est autre qu'un convertisseur statique muni d'une commande de poursuite du PPM.

Un convertisseur élévateur ou autrement dit Boost, ou bien un hacheur parallèle, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en entrée en une autre tension continue en sortie de plus forte valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à gauche du PPM (tension du point de fonctionnement inférieure à celle du PPM).

Le convertisseur Boost est composé essentiellement d'un interrupteur K (MOSFET) et d'une diode D . L'interrupteur K est commandé par un signal à modulation de largeur d'impulsion (MLI) de période de découpage T fixe et de rapport cyclique variable α . Durant chaque période, K est fermé de l'instant 0 à αT et ouvert de αT à T . Le convertisseur peut fonctionner suivant deux modes de fonctionnements dépendant de sa capacité de stockage d'énergie, de la période de commutation et de la charge, on distingue [Belk15] :

- *Mode de conduction discontinue (MCD)* : l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée totalement. Le courant dans l'inductance s'annule avant la fin d'une période de commutation. Le courant dans l'inductance est discontinu.
- *Mode de conduction continue (MCC)* : l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée partiellement. Le courant dans l'inductance ne s'annule pas sur une période de commutation. Le courant est donc continu.

La figure I.15 présente le schéma électrique basique de ce convertisseur.

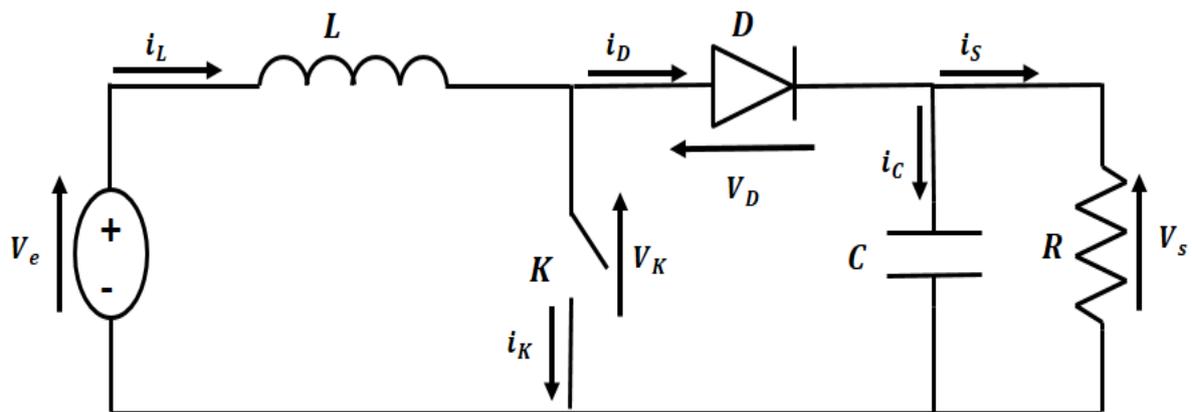


Fig. I.15. Schéma de base d'un boost habituel

Durant le temps $0 < t < \alpha T$, lorsque l'interrupteur K est fermé et la diode D est bloquée, le circuit du convertisseur devient :

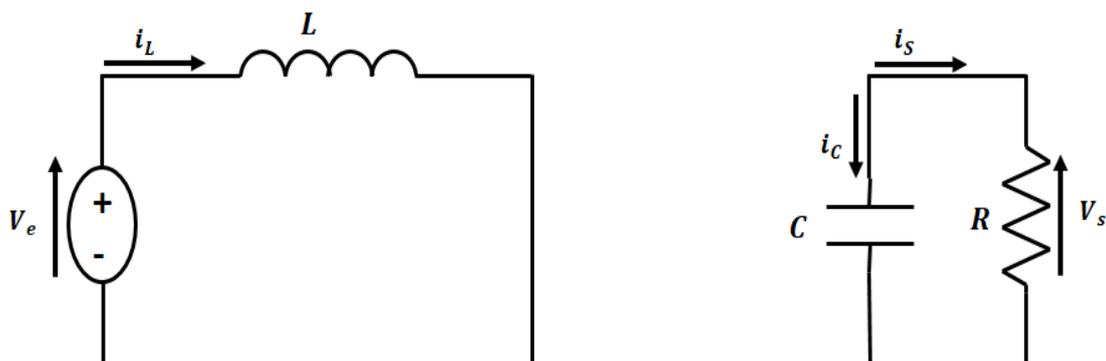


Fig. I.16. Schéma équivalent du boost quand l'interrupteur est fermé

$$V_e = L \frac{di_L}{dt} \quad (I.10)$$

De l'équation I.10, on obtient le courant aux bornes de l'inductance :

$$\Delta i_L = \frac{V_e}{L} \alpha T \quad (I.11)$$

Avec

$$\Delta i_L = i_{max} - i_{min} \quad (I.12)$$

i_{min} la valeur minimale du courant dans l'inductance à l'instant $t = 0$, i_{max} la valeur maximale du courant dans l'inductance est atteinte à l'instant $t = \alpha T$.

En remplaçant l'équation I.12 dans l'équation I.11, on obtient :

$$i_{max} = i_{min} + \frac{V_e}{L} \alpha T \quad (I.13)$$

Et durant l'intervalle de temps $\alpha T < t < T$, lorsque l'interrupteur K est ouvert et la diode D est passante, le circuit du convertisseur devient équivalent à :

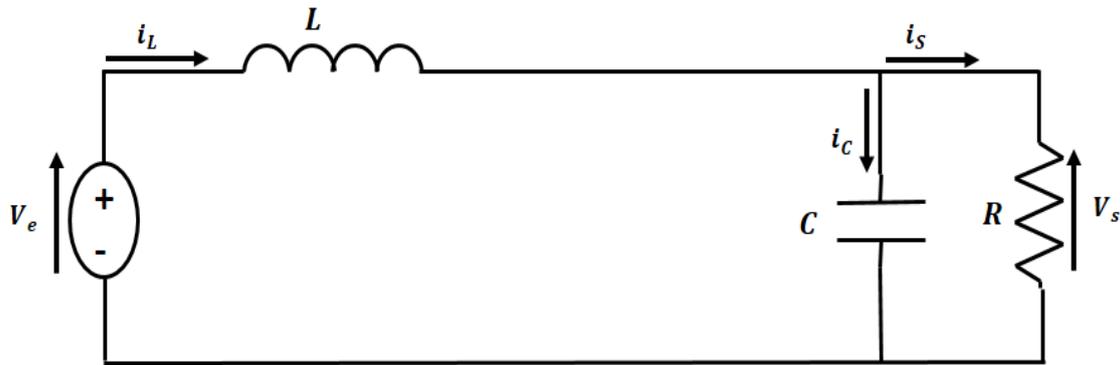


Fig. I.17. Schéma équivalent du boost quand l'interrupteur est ouvert

$$V_e - V_s = L \frac{di_L}{dt} \quad (I.14)$$

$$\Delta i_L = \frac{V_e - V_s}{L} (1 - \alpha) T \quad (I.15)$$

A l'instant $t = T$, le courant dans l'inductance revient à sa valeur minimale i_{min} , d'où :

$$i_{min} = i_{max} + \frac{V_e - V_s}{L} (1 - \alpha) T \quad (I.16)$$

L'égalité de l'ondulation de courant des équations I.11 et I.15, donnent l'équation : naissance à la relation importante du boost donné par :

$$V_s = \frac{1}{1 - \alpha} V_e \quad (I.17)$$

De l'équation I.17, on peut tirer le rapport de conversion du boost :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{1-\alpha} \quad (\text{I.18})$$

La tension de sortie du convertisseur peut être contrôlée en variant la tension d'entrée ou le rapport cyclique. Celui-ci varie toujours entre 0 et 1, le montage est un élévateur de tension. Le transistor MOSFET doit fonctionner à basse tension pour présenter des pertes faibles. Le montage Boost habituellement utilisé pour produire des hautes tensions applique sur le transistor la tension produite sur sa sortie. Ainsi, il semble exclu d'utiliser les transistors MOS pour les Boosts en haute tension.

I.8.2. Convertisseur Boost à couplage magnétique (MCB)

Le montage Boost classique présente des pertes importantes au niveau du transistor de découpage, surtout si la tension appliquée à ce dernier est importante. P. Petit [Peti11] a proposé un montage boost différent qui sert à minimiser les pertes en abaissant la tension appliquée au transistor d'où une amélioration du rendement du boost, s'appelle Boost à Couplage Magnétique (*Magnetically Coupled Boost* : MCB). Ce nouveau montage proposé contenant deux bobines couplées magnétiquement.

Le circuit résultant après les étapes de calculs et dimensionnement des dispositifs, est résumé par le schéma de la figure suivante :

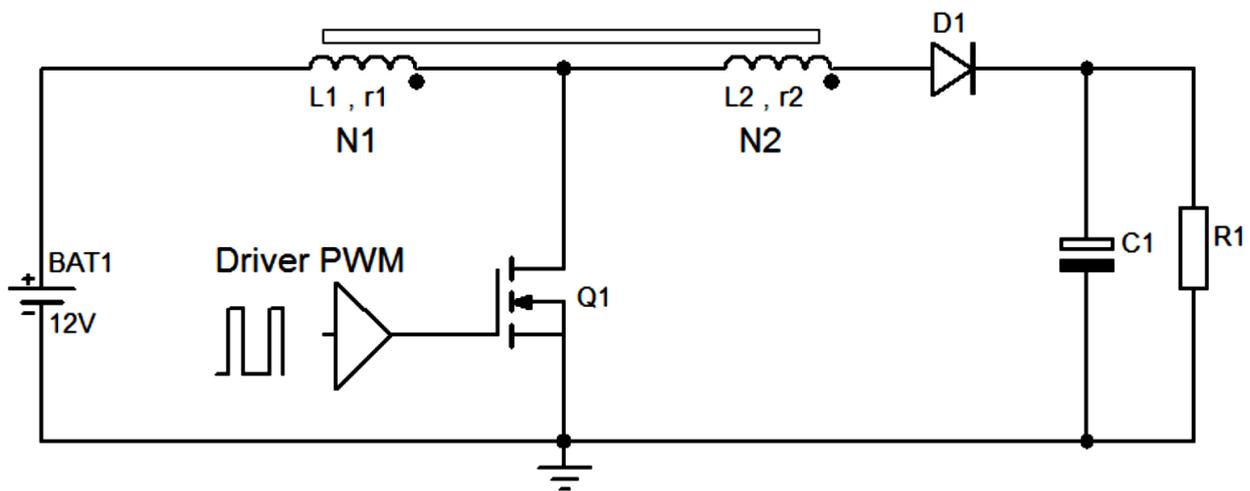


Fig. I. 18. Schéma de principe du Boost à couplage magnétique [Peti11]

Le fonctionnement du MCB est décomposé en deux modes de conduction selon l'ouverture ou la fermeture du MOSFET :

- En mode passant du transistor à $0 < t < \alpha T$ (fermeture du MOSFET, la résistance $R_{dson} = 0$) :

Lorsque le transistor est en mode passant, la résistance de ce mode entre le drain et la source est très petite, le transistor se comporte comme un interrupteur fermé de résistance nulle. Dans ce cas d'après Petit [Petil1], la bobine primaire est soumise à une tension d'entrée fixe et le sens du couplage des bobinages est tel que la tension en sortie du bobinage de sortie est négative, donc la diode $D1$ est naturellement bloquée. Cependant, seul le primaire est actif, ainsi, la tension constante sur $L1$ va faire évoluer le courant dans la self primaire ($L1$) de façon linéaire en fonction du temps. La self étant considérée non saturable [Petil1]. Le fonctionnement du MCB est identique à ceux d'un boost habituel. L'évolution du courant i_{L1} vaut donc :

$$i_{L1} = \frac{V_e}{L1} t \quad (I.19)$$

A la fin de la conduction du transistor, le courant prend la valeur :

$$i_1 = \frac{V_e}{L1} \alpha T \quad (I.20)$$

ou i_1 est le courant maximal dans l'inductance primaire, α est le rapport cyclique de découpage.

- En mode bloqué du transistor à $\alpha T < t < T$ (ouverture du MOSFET) :

Le blocage du courant dans la self primaire va engendrer dans cette self une surtension qui s'applique directement sur le Drain du transistor MOS. Cette surtension se trouve transmise au secondaire avec un effet multiplicateur dépendant du rapport des nombres de spires $m = \frac{N_2}{N_1}$. Cette tension est positive si on tient compte du sens des bobinages. La diode $D1$ se met donc en conduction et transfère de l'énergie vers la charge sous une tension élevée [Petil1]. Cette partie du boost MCB avait été un sujet de recherche par les équipes de LMOPS, et fait l'objet d'une thèse de doctorat de Pierre Petit, l'objectif est atteint par le nouveau rapport de transformation qui est donné par :

$$m = \frac{(1-\alpha)}{\alpha} \left(\frac{V_s}{V_e} \right) - \frac{1}{\alpha} \quad (I.21)$$

Ce nouveau rapport de transformation permet d'avoir un rapport cyclique ajustable. Pour une valeur de α symétrique voisine de $\frac{1}{2}$ selon Petit, permet d'avoir un temps de transfert de l'énergie dans la diode de récupération rallongé par rapport à un Boost classique. Le courant sera donc diminué et les pertes le seront d'autant.

I.9. Algorithmes MPPT

La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) est une commande essentielle pour un fonctionnement optimal du système photovoltaïque. Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV [Abbe13]. C'est-à-dire, fixer le point de fonctionnement toujours aux alentours du PPM.

Il existe dans la littérature de nombreuses méthodes de recherche du point de puissance maximale PPM d'un module photovoltaïque ou générateur PV. Les principales différences entre ces méthodes sont la mise en œuvre numérique ou analogique, la simplicité de la conception, la plage d'efficacité ainsi que les coûts matériels. Parmi ces méthodes on cite :

- Méthode dite de la tension de circuit ouvert fractionnaire (Fractional Open-Circuit Voltage) [Abbe14, Sury11].
- Méthode dite du courant de court-circuit fractionnaire (Fractional Short-Circuit Current) [Abbe14, Sury11].
- Contrôle du PPM à base de réseaux neuronaux (Neural Network) [Guel16, Kand17].
- Méthode de l'incrémentation de l'inductance (Incremental Conductance InCond) [Guel16, Kand17, Hlai16].
- Contrôle du MPPT à base de logique floue (Fuzzy Logic Control) [Guel16, Kand17].
- Méthode de perturbation et d'observation (P&O) [Sahu14, Kand17].
- Méthode de Hill Climbing (HC) [Rath14, ElKh16].

Je vais présenter afin uniquement d'étudier le principe de fonctionnement mais sans rentrer dans une étude exhaustive, hors sujet de ma thèse, deux méthodes largement utilisées de suivi de PPM.

I.9.1. Méthode Perturb and Observe P&O

La méthode P&O est la plus populaire et la plus efficace pour son faible coût, sa facilité d'implantation, sa structure simple et ses quelques paramètres mesurés. Elle ne mesure que la tension (V) et le courant (I) du GPV. La méthode P&O consiste à perturber en permanence la tension du GPV d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'observer le comportement de la variation de puissance qui en résulte [Caba08, Amar14, Sahn14], ce qui signifie que la tension aux bornes du GPV fluctue autour de la tension PPM même si l'irradiation solaire et la température de la cellule sont constantes [Elge12, Hlai16].

La tension de sortie du générateur photovoltaïque et le courant de sortie peuvent être l'objet de contrôle. Le contrôleur du système PV modifie la sortie du générateur PV avec une étape plus petite à chaque cycle de contrôle. La taille des pas est généralement fixe, tandis que le mode de fluctuation peut être augmenté ou diminué. Il dépend du fait que la dérivée de la puissance par rapport à la tension est nulle au point PPM [Cher14, ElKh16].

I.9.2. Méthode de Hill Climbing

Cette commande est regroupée sous la méthode P&O, contient une action de commande associée avec une action de recherche [Boit08]. La théorie de fonctionnement de base de la

méthode de Hill Climbing est similaire à celle de la méthode P&O, Les deux méthodes utilisent la condition que $P(n)$ soit supérieur à $P(n-1)$ ou non pour porter un jugement. La méthode P&O utilise la condition dP/dV pour déterminer si le point de puissance maximum a été trouvé ou non. Cependant, la méthode de Hill Climbing utilise la condition $dP/d\alpha$ pour juger [Kaly14].

Dans la plupart des applications, les convertisseurs DC-DC sont généralement utilisés comme dispositifs d'interface d'alimentation entre les modules PV et les charges.

Lorsque la condition $dP/d\alpha = 0$ est remplie, cela signifie que le point de puissance maximale a été atteint.

Le rapport cyclique dans chaque période d'échantillonnage est déterminé par la comparaison de la puissance actuelle et la précédente :

- Si la puissance incrémentielle $dP > 0$, le rapport cyclique doit être augmenté afin de faire $d\alpha > 0$.
- Si $dP < 0$, le rapport cyclique est alors réduit pour rendre $d\alpha < 0$ [Rath14].

La technique Hill Climbing (HC) [AlAt05, Xiao04] est une méthode mathématique d'optimisation [Belk15]. Comme son nom l'indique, elle fait monter le point de fonctionnement le long d'une caractéristique pour atteindre le maximum de la fonction puissance du GPV contre le rapport cyclique du convertisseur α comme le montre la figure 1.19.

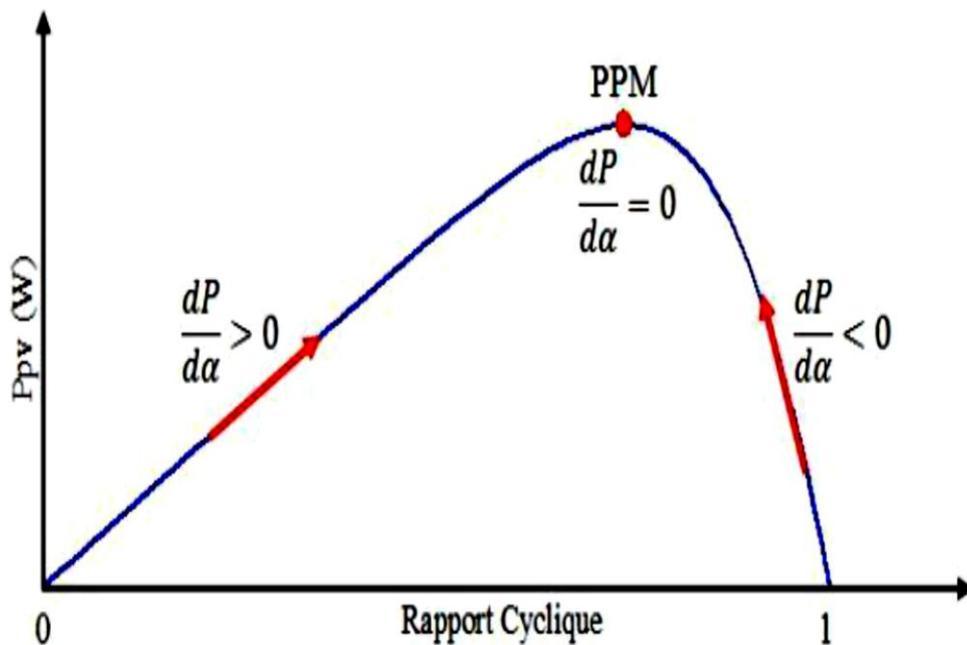


Fig. I.19. Principe de la méthode HC [Belk15]

La perturbation de la puissance est appliquée pour plusieurs itérations sur le paramètre α en l'incrémentant ou en le décrémentant avec un pas de $\Delta\alpha$ jusqu'à avoir la dérivée de la

puissance par rapport au rapport cyclique, $dP / d\alpha$, nulle. La figure I.20 présente l'algorithme d'exécution de cette technique.

La variable « signe » peut prendre la valeur « 1 » ou « -1 », elle indique la direction de la perturbation de la puissance que l'on doit donner à la poursuite du point de fonctionnement optimal pour augmenter la puissance en sortie du panneau, P et α sont la puissance du GPV et le rapport cyclique respectivement.

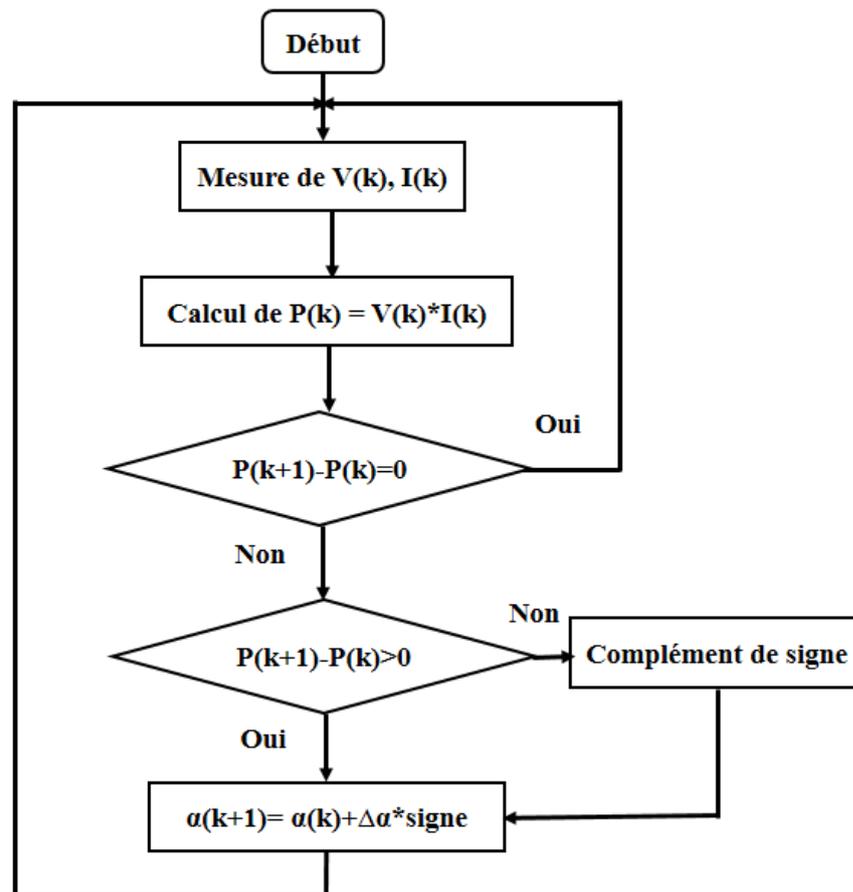


Fig. I.20. Algorithme de la méthode HC

Périodiquement, la valeur de la puissance du nouvel point de fonctionnement après avoir exécuter la perturbation $P(k + 1)$ est comparée à celle déterminée précédemment $P(k)$, en fonction du résultat de la comparaison, la variable « signe » change de valeur ou reste identique. Ce qui a pour effet d'incrémenter ou de décrémenter la valeur du rapport cyclique $\Delta\alpha$.

La méthode HC est plus simple à mettre en œuvre car elle possède une seule boucle de régulation. Cependant, l'inconvénient de cette technique est qu'elle présente des oscillations et peut même diverger lors du changement rapide des conditions atmosphériques et peut parfois prendre un point de fonctionnement loin du point optimal et dans une mauvaise direction [EIKh16, Cava07, Xiao04, Zega11a].

I.10. Conclusion

Ce chapitre est consacré à la présentation générale détaillée de différents étages de la chaîne de conversion d'énergie du système étudié. On a commencé par le principe de fonctionnement des cellules PVs et des GPV, suivi par un introductif de la technologie de fabrication et la modélisation de la cellule photovoltaïque comme élément de base d'un générateur PV.

Cependant, l'étage d'adaptation d'impédances entre le générateur photovoltaïque et la charge à alimenter est largement discuté dont le convertisseur spécial développé au laboratoire LMOPS, le boost MCB est présenté car il est sujet de nos expérimentations.

Le chapitre a été clôturé par une présentation des algorithmes de poursuite de point de puissance maximale, de telle façon à garantir un transfert maximal de la puissance du générateur PV vers la charge ; le MPPT utilisé en expérimentation est amplement discuté.

CHAPITRE II

Chapitre II

Méthode des plans d'expériences : Description et analyse

II.1.	Introduction	39
II.2.	Théorie des plans d'expériences	39
II.3.	Technique de criblage	48
II.4.	Technique de surface de réponse	633
II.5.	Conclusion.....	733

II.1. Introduction

La modélisation est une étape indispensable permettant de prédire un modèle représentatif de comportement du système d'étude. En ce qui nous concerne, elle est la plateforme qui précède l'étape de simulation et de caractérisation d'un système de production d'énergie électrique d'origine renouvelable.

La méthode des plans d'expériences (en anglais : *Design of Experiment method* ou brièvement *DoE*) est un outil important pour améliorer les performances d'un processus au stade d'étude, elle permet d'extraire les informations les plus utiles à partir des données expérimentales ainsi que d'éliminer les variables qui présentent une faible contribution. La méthode *DoE* consiste à faire varier simultanément les niveaux d'une ou plusieurs variables à chaque expérience. Ceci va permettre de diminuer fortement le nombre d'expériences à réaliser tout en augmentant le nombre de variables étudiées et par ailleurs en détectant les interactions entre les facteurs et les optimaux par rapport à une réponse [Hann13, Mich15, Guen16, Mikk17]. Classiquement, la méthodologie expérimentale utilisée pour la modélisation et simulation consiste à fixer le niveau de toutes les variables sauf une et à mesurer la réponse du système pour différentes valeurs de cette variable, cela implique à réaliser un nombre considérable d'essais en un temps très considérable, ce qui est souvent irréalisable, et avec un coût élevé, ce qui en général n'est pas possible à être supporter [Gill97, Fauc06, Zegal1b, Moço16]. L'intérêt dans ce contexte de la méthode *DoE* est de répondre aux défis ci-dessus par la variation simultanée de toutes les variables contrôlées, afin d'extraire un maximum d'information en un minimum d'essais.

La méthode *DoE* est utilisée dans de nombreux domaines appliqués des sciences et de la technologie. Dans notre étude en lien avec la production d'énergie d'origine photovoltaïque, et de fait, tout au long des chapitres suivants, nous nous sommes attachés à modéliser et à caractériser la cellule PV, le module PV et le bus continu HVDC (*High Voltage Direct Current*) photovoltaïque en utilisant la méthode des plans d'expériences. Dans le présent chapitre, nous allons présenter la méthode des plans d'expériences comme une solution alternative aux problèmes posés précédemment. Nous aborderons la notion générale de l'aspect expérimental tout en utilisant des notions de statistiques. Nous poursuivrons, de façon original, ensuite par une modélisation mathématique par la méthode *DoE* d'un générateur photovoltaïque GPV pour déterminer le modèle prédictif comportemental des réponses sélectionnées en fonction des facteurs pertinents, influençant le fonctionnement global du système de production énergétique.

II.2. Théorie des plans d'expériences

Réaliser des expériences afin d'étudier et de comprendre un phénomène est une démarche qui été utilisée dès le moyen-âge, Nicolas Oresme (1325-1382) aborde cette question dans ces écrits. Francis Bacon (1561-1626) est un des précurseurs de la méthode expérimentale. En 1627, il fait macérer des grains de blé dans neuf concoctions différentes afin d'étudier leur effet sur la rapidité de germination. Arthur Young (1746-1820) cherche ensuite à systématiser le procédé et aborde la notion de répétabilité des expériences. Dans ces travaux qui concernent surtout

l'agronomie, nous pouvons citer aussi les travaux de Cretté de Palluel (1741-1798) qui propose un protocole expérimental destiné à comparer les mérites de pommes de terre dans l'engrais des moutons de l'étable, et les expériences médicales menées par Claude Bernard (1813-1878) [Droe97, Tins10].

Les applications des plans d'expériences ont tendance actuellement à se diversifier avec leur diffusion à grande échelle notamment dans les entreprises, leur enseignement et leurs applications dans les universités [Kara04]. Les méthodes rigoureuses d'expérimentations, sont dues aux travaux de Sir Ronald Fisher (1890-1962). En 1925, Fisher pour la première fois proposa une méthode avec laquelle on étudiait plusieurs facteurs à la fois, Ceci a constitué le point de départ de la méthode théorique des plans d'expériences [Fich71]. Divers chercheurs ont parlé et marché sur les traces de Fisher afin de promouvoir et développer l'utilisation des techniques de planification expérimentales dans d'autres domaines que l'agronomie. Mais ce sont certainement les travaux de G. Taguchi [Tagu90] qui ont permis une immense diffusion des plans d'expériences notamment dans le milieu industriel au Japon. G. Taguchi a eu l'idée de réaliser des tables de configurations expérimentales de référence facilement utilisables par les non-spécialistes, il a inclus aussi l'expérimentation dans une démarche amenant à la conception de produits fiables et de bonne qualité. Ses idées ont été mises en œuvre dans un bon nombre d'industries japonaises dès les années 1970 [Tins10]. Les années 1970 connaissent la diffusion et utilisation de ces travaux aux Etats-Unis, puis dans les années 1980, son utilisation par les grandes entreprises industrielles en Europe [Hoin09].

II.2.1. Principe de fonctionnement

Toute expérience devrait être l'objet d'une planification précise se concrétisant sous la forme d'un plan d'expérience. On entend par plan d'expérience, la suite ordonnée d'essais d'une expérimentation, chacune permettant d'acquérir de nouvelles connaissances en contrôlant un ou plusieurs paramètres d'entrée pour obtenir des résultats en sortie validant un modèle avec une bonne économie.

L'étude d'un phénomène revient souvent à s'intéresser à une grandeur particulière en sortie qui porte le nom de réponse et l'ensemble de paramètres en entrée susceptibles de modifier cette réponse qui sont appelés facteurs. La méthode *DoE* ne nécessite pas la connaissance approfondie du système, mais le considère comme une boîte noire et s'intéresse seulement aux facteurs et aux réponses du système étudié comme le montre la figure II.1. La Méthode *DoE* est une technique qui consiste à déterminer l'effet de différents facteurs sur la variation de la réponse. Elle utilise la méthodologie statistique afin d'analyser les données et prédire les performances d'un produit sous les conditions limitées par le domaine expérimental.

Les objectifs des plans d'expériences sont de faire des analyses initiales pour déterminer quelles réponses sont importantes pour l'amélioration du système ou du processus, prédire les facteurs qui peuvent affecter ces réponses et modéliser les relations entre les facteurs et les réponses et entre les facteurs et la variabilité des réponses [Gord15, Char15, Wann15].

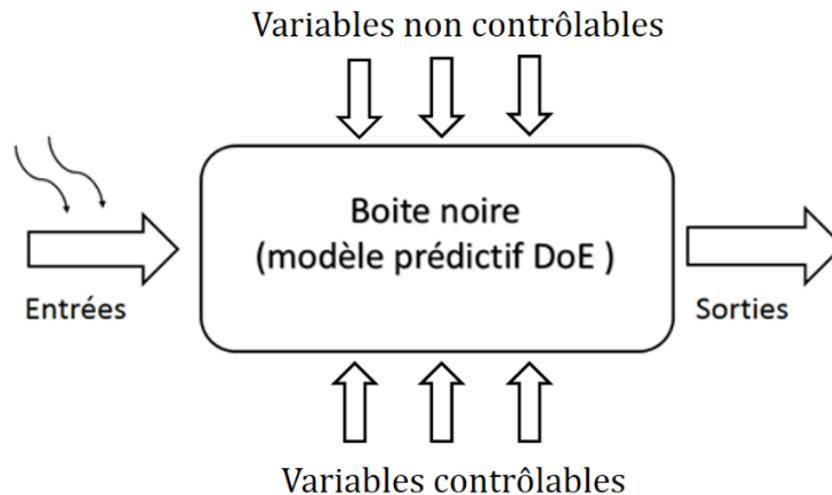


Fig. II.1. Schéma représentatif de la méthode *DoE*

Parmi les entrées (les facteurs) du système dont on cherche à analyser son influence sur la sortie (la réponse), on distingue [Goup06a, Trib08, Anto14] :

- les variables contrôlables qui dépendent directement du choix du technicien ou du chercheur,
- les facteurs non contrôlables qui varient indépendamment du choix du technicien ou du chercheur.

La figure II.2 présente le processus général de connaissances de la méthodologie des plans d'expériences, qui se repose sur trois étapes [Vivi02, Kara04, Rabi07, Kess20c] :

- **Etape 01** : Formalisation du problème ; cette première phase est consacrée à poser la problématique permettant de trouver une réponse à une question posée. Cela nécessite de déterminer les objectifs de l'étude à atteindre ainsi qu'une définition des différentes variables d'entrées et de sorties. Ces dernières permettent la construction du plan d'expérience de l'étude.
- **Etape 02** : Choix de la stratégie servant à la réalisation des expériences choisies par l'expérimentateur afin d'atteindre l'objectif voulu :
 - Plans pour l'étude de criblage (plan de screening) : la technique de criblage permet de déterminer, parmi les facteurs recensés par l'expérimentateur, ceux qui ont une influence statistiquement non négligeable sur les variations de la réponse. Il s'agit donc d'un procédé de sélection ou de criblage. En plus des facteurs influents, il est également possible d'identifier les interactions de facteurs qui auront une influence significative sur la réponse. Elle constitue une étape importante avant toute analyse ultérieure plus fine, notamment assurée par la méthodologie des surfaces de réponses.
 - Plans pour modélisation des surfaces de réponses, MSR, (plan d'optimisation) : dans cette méthodologie, les variations de la réponse sont calculées en fonction des facteurs et interactions précédemment jugés influents. Le but étant de déterminer comment la réponse varie.

- **Étape 03** : Analyses et interprétation des résultats que ce soient : mathématiques, statistiques ou graphiques pour valider les conclusions obtenues.

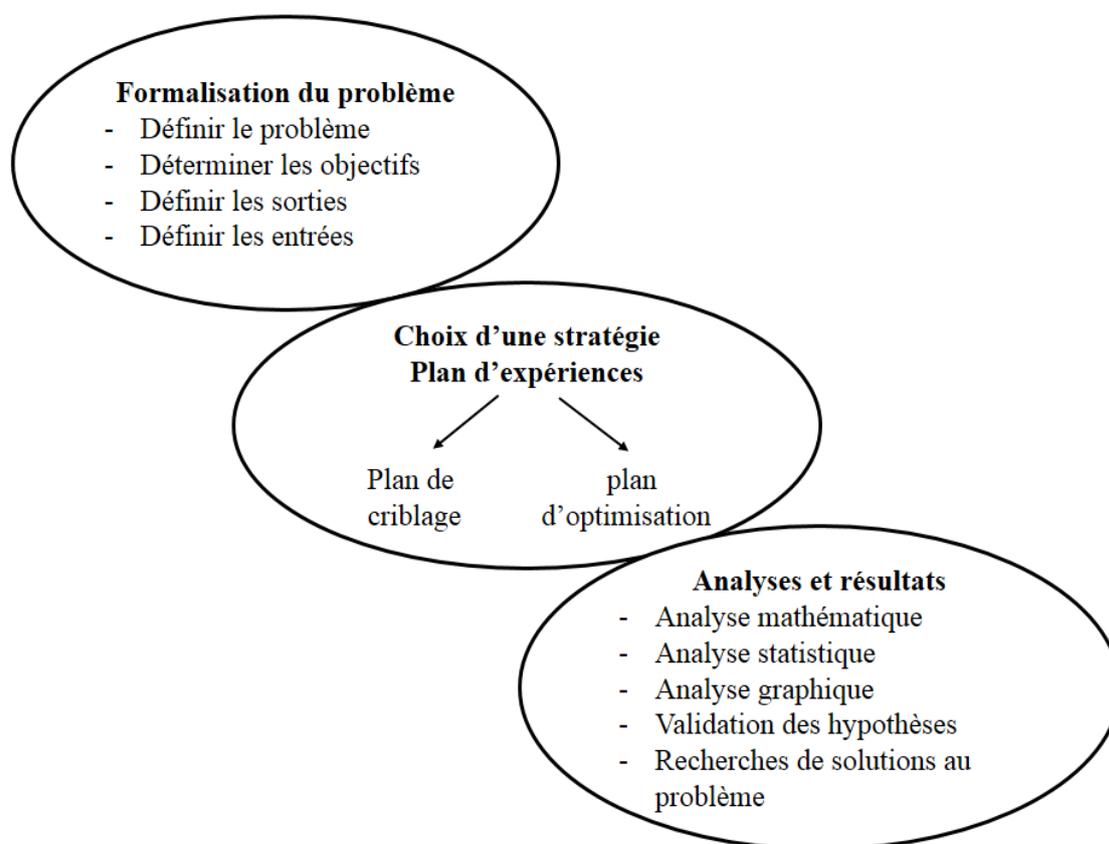


Fig. II.2. Schéma synoptique de la méthode des plans d'expériences [Kara04]

II.2.2. Planification des plans d'expériences

La méthodologie des plans d'expériences conduit à minimiser le plus possible le nombre d'expérience sans sacrifier la précision sur les résultats ; c'est-à-dire "obtenir un maximum d'information en un minimum d'expériences" [Goup93, Tins10, Lemo16]. Les plans d'expériences ne sont pas un outil destiné à priori à la recherche fondamentale, car ils ne permettront jamais une explication du phénomène physico-chimique étudié mais, néanmoins ils participeront à leur meilleure compréhension [Trib08].

L'utilisation des plans d'expérience permettra ainsi d'atteindre les buts suivants :

- ✓ La conception d'un nouveau produit ou procédé (détermination des facteurs clés)
- ✓ L'optimisation des réglages d'un procédé de fabrication.
- ✓ La prédiction par modélisation du comportement d'un procédé.

Une relation de modélisation est alors systématiquement déduite [Alkh11]. La problématique est comment fait-on varier simultanément plusieurs facteurs pour avoir une bonne réponse ? On cherche à construire des plans d'expériences ayant de bonnes propriétés avec peu d'expériences.

II.2.3. Variables

Comme indiqué précédemment, l'utilisation de la technique des plans d'expériences sert à déterminer une relation entre les deux types de variables suivants :

- La **réponse** : qui correspond à la grandeur physique étudiée,
- Les **facteurs** : qui correspondent aux grandeurs physiques modifiables par l'expérimentateur susceptibles d'influer sur les variations de la réponse.

Nous allons maintenant préciser les spécificités plus détaillées de chacune de ces variables.

II.2.3.1. Réponse

La réponse est la grandeur qui est observée à chaque expérience réalisée et qui prend une seule valeur. Dans le processus d'optimisation, la grandeur étudiée dont on cherche les meilleurs résultats est appelée fonction réponse. On définit également les fonctions de contrainte qui définissent les expériences non réalisables. Ces fonctions mènent à plusieurs réponses du système étudié.

II.2.3.2. Facteur

Les facteurs sont les grandeurs modifiables par l'expérimentateur, contrôlables qui influent sur les variations des réponses. L'ensemble des facteurs donnés par l'expérimentateur ne sont pas obligatoirement les seuls qui influent sur les variations de la réponse. La différence fondamentale entre la notion classique de variable et celle de facteur tient donc dans le fait que tout facteur doit pouvoir être modifié sans difficulté [Tins10].

Dans la théorie des plans d'expériences, on représente un facteur par un axe gradué et orienté. La graduation de ces axes peut être en grandeurs normales ou en grandeurs conventionnelles sans dimensions appelées grandeurs codées. Ces dernières grandeurs sont très utiles pour avoir une présentation unifiée et générale des plans d'expérience [Goup05]. On distingue plusieurs types de facteurs [Vivi02, Goup13] :

- ❖ Facteur continu ou quantitatif : est un paramètre qui s'exprime par un nombre. Dans un intervalle donné d'un facteur, on peut choisir toutes les valeurs possibles. Tels que : la pression, la concentration, la température...etc.
- ❖ Facteur discret ou qualitatif : se caractérise par un ensemble discontinu d'états, donc le facteur peut prendre que des valeurs particulières. On peut présenter un facteur discret par un nom, une lettre ou une propriété. Par exemple, la couleur d'un produit...etc
- ❖ Facteur ordonnable : il s'agit d'un facteur discret que l'on peut mettre dans un ordre logique. Par exemple, grand, moyen, petit ou premier, deuxième et troisième...etc
- ❖ Facteur booléen : est un facteur discret qui ne peut prendre que deux valeurs : haut ou bas, ouvert ou fermé,...etc.

La valeur donnée à un facteur pour réaliser une expérience est appelée niveau. Un facteur peut avoir plusieurs niveaux, deux niveaux sont particulièrement importants : le niveau bas qui est la plus petite valeur attribuée au facteur et le niveau haut qui est la plus élevée. Ces valeurs sont définies par l'expérimentateur selon les spécificités de l'étude. L'ensemble de toutes les valeurs que peut prendre un facteur entre le niveau bas et le niveau haut constitue le domaine du facteur (domaine d'étude).

II.2.3.3. Espace expérimental

Dans la théorie de la méthode *DoE*, chaque facteur est représenté par un axe gradué et orienté. Ces graduations d'axe peuvent être en valeurs réelles ou en valeurs sans dimensions [Gou07]. Pour chaque essai expérimental, la valeur donnée à un facteur est appelée un « niveau ». Les deux niveaux importants que sont haut et bas représentent les valeurs mesurées, la plus élevée et la plus petite attribuées respectivement au facteur. La variation d'un facteur est limitée entre ces deux limites. Les facteurs sont disposés orthogonalement les uns au-dessus des autres, constituant un espace à deux dimensions pour représenter géométriquement deux facteurs, ce qu'on appelle « l'espace expérimental ». L'espace expérimental comprend tous les points du plan " facteur 1 \times facteur 2 ". S'il existe un troisième facteur, on le représente aussi par un axe orienté et gradué, et se positionne perpendiculairement sur les deux autres axes. Mais à partir de quatre facteurs, il n'y a plus de représentation géométrique possible. Dans ce cas, il faut adopter une représentation purement mathématique de l'espace expérimental en utilisant la notion de matrices.

Dans le développement expérimental de la méthode *DoE*, l'expérimentateur délimite une partie de l'espace expérimental pour la réalisation de l'étude. Cette zone est définie par les intersections des niveaux hauts et des niveaux bas des facteurs comme le montre la figure II.3.

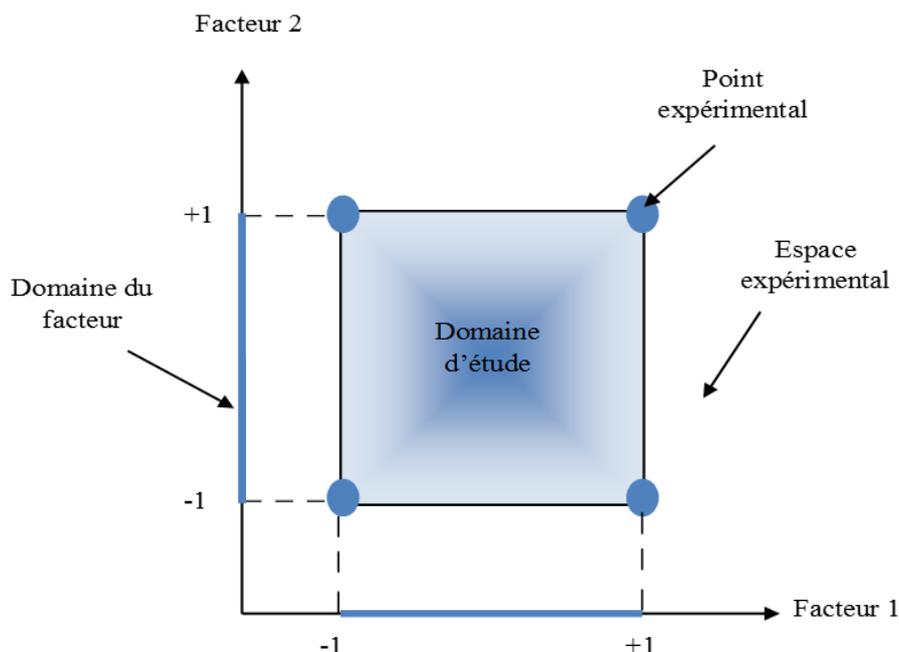


Fig. II.3. Représentation d'un plan d'expérimentation à deux facteurs

L'espace ainsi délimité est dénommé « domaine d'étude ». L'intersection des niveaux haut et bas des facteurs, les bords du domaine d'étude, positionnent les points expérimentaux qui encerclent l'ensemble de ces points constitué par les essais expérimentaux ou les essais de l'étude à réaliser.

II.2.3.4. Coordonnées centrées réduites

La figure II.4 illustre la différence entre la méthode traditionnelle et la méthode des plans d'expériences. La méthode expérimentale traditionnelle (classique) consiste à bloquer le facteur 1 au centre du domaine de variation et à faire varier le facteur 2 aux deux extrémités de son domaine. La procédure réciproque est appliquée pour le facteur 2. Dans cette méthode, l'effet du facteur 1 pourra être calculé à partir des deux mesures M3 et M4 et l'effet du facteur 2 à partir des deux mesures M1 et M2. Donc, la moitié des mesures seulement est utilisée pour calculer l'effet d'un facteur [Gill97, Trib08].

Ainsi, la méthode des plans d'expériences consiste à prendre les mesures aux extrémités du domaine expérimental (Y1, Y2, Y3, Y4). L'effet du facteur 1 est calculé à partir des quatre mesures, il est donné par la différence entre les moyennes des réponses au niveau haut (Y2, Y3) et la moyenne au niveau bas (Y1, Y4). Donc tous les points sont inclus dans le calcul d'un effet. Il est également possible de calculer l'interaction entre les facteurs ce qui est impossible par la méthode classique [Gill97, Trib08].

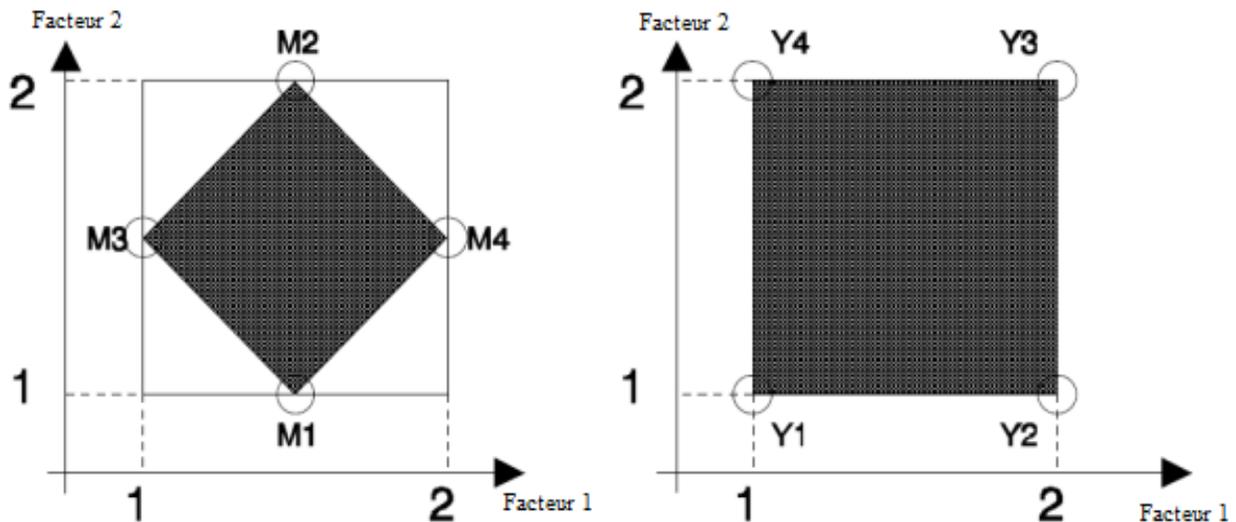


Fig. II.4. Délimitation du domaine d'étude ; (a) choix des points expérimentaux selon la méthode traditionnelle et (b) choix des points expérimentaux selon les plans d'expériences

Avec le même nombre de points expérimentaux utilisés dans le calcul des effets, la précision obtenue par la méthode des plans d'expériences est supérieure à celle obtenue par la méthode classique. Ainsi que la surface passant par les points aux extrémités est optimale et donne plus d'informations [Gill97, Fauc06, Trib08].

La notation de **YATE**, [Goup05, Goup07], va alors être utilisée pour définir les niveaux des facteurs, c'est-à-dire que l'on va attribuer la valeur « -1 » au niveau bas du facteur et la

valeur « +1 » au niveau haut. Cela revient à utiliser des variables centrées réduites. Cette notation permettra à une représentation simple des combinaisons des niveaux et un calcul aisé des effets et des interactions.

Afin d'obtenir une représentation commune des unités dans la théorie du *DoE*, la notion de système de coordonnées centré réduites est couramment utilisée. Les coordonnées normalisées résultantes sont déterminées par une translation linéaire des coordonnées originales (réelles) du système jusqu'à ce qu'une représentation centrée soit réalisée dans le domaine expérimental et avec une normalisation de ces axes conduisant à la représentation réduite avec les niveaux supérieurs et inférieurs des facteurs prenant des valeurs « +1 » et « -1 », respectivement [Goup05, Goup07]. L'avantage de l'utilisation de ces unités normalisées réside dans leur pouvoir de présenter des expériences conçues de la même manière, quels que soient les domaines expérimentaux choisis et quelles que soient les amplitudes des facteurs. La conversion des coordonnées originales A aux coordonnées centrées réduites x est donnée par la formule :

$$x = \frac{A-A_0}{Pas} \quad (\text{II.1})$$

A_0 étant la valeur centrale en unité courante, Pas est la moitié de la différence entre les deux niveaux de la valeur courante, soient :

$$A_0 = \frac{A_{+1}+A_{-1}}{2} \quad (\text{II.2})$$

avec le pas défini par

$$Pas = \frac{A_{+1}-A_{-1}}{2} \quad (\text{II.3})$$

II.2.4. Choix du plan d'expériences

Il existe actuellement un nombre considéré de plans différents, chacun associé à la résolution de problèmes particuliers. L'essentiel est de mettre en œuvre un plan d'expériences qui répond aux questions posées afin d'atteindre l'objectif souhaité. On peut, ci-après, citer ici les trois plans les plus connus et utilisés :

II.2.4.1. Plan factoriel complet

Pour effectuer le moins d'essais possibles, le meilleur choix de l'emplacement des expériences est de prendre les points qui se situent aux sommets du domaine d'étude, ce type de plan s'appelle un plan factoriel complet, sa notation conventionnelle est de 2^k ou k représente le nombre de facteurs, et le 2 représente le nombre de niveaux par facteurs. Le plus souvent le plan factoriel complet est de 2^2 ; c'est-à-dire un plan factoriel complet à deux facteurs. La figure II.5 présente la forme géométrique d'un plan d'expérience, ou cette forme n'est plus valable pour un nombre de facteurs supérieur à trois. Pour cette raison on adopte une

représentation sous forme de tableau. Il sera possible maintenant d'insérer la matrice d'expérience qui permet de déterminer les essais à réaliser et de les rassembler dans une table, ou chaque ligne de cette table représente une expérience et chaque colonne est dédiée à un facteur. Pour chacune des expérimentations, on associe le critère que l'on cherche à améliorer ou bien la réponse.

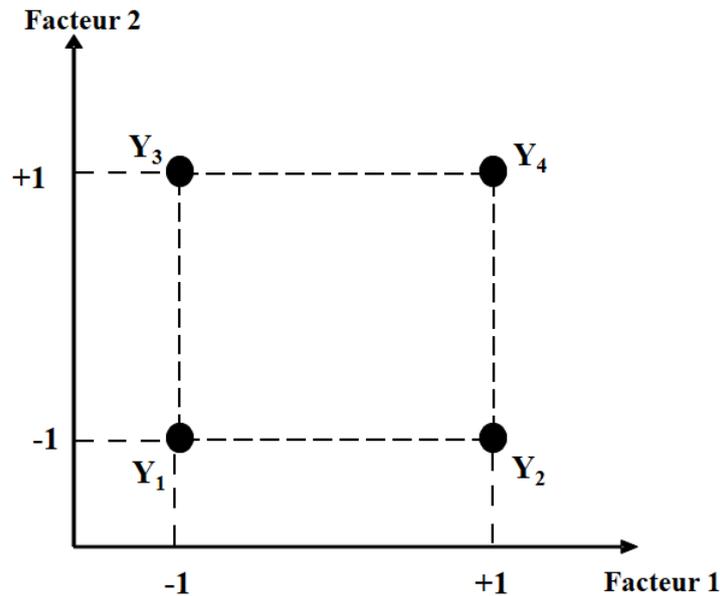


Fig. II.5. Illustration d'un plan factoriel complet

Notre travail de thèse est basé sur un plan factoriel complet 2^2 , donc à réaliser quatre essais dans le simple cas. Il aurait été également possible d'augmenter le nombre d'essais afin d'obtenir plus d'information sur le modèle et leur précision, au-delà de plusieurs facteurs ($k \geq 4$) à deux niveaux, représentant 2^k expériences, mais ceci aurait rendu la réalisation de ces expériences impossible (c'est l'inconvénient de la méthode des plans d'expérience). Des alternatives ont été introduites, d'où l'existence de plusieurs plans dans la littérature [Vivi02, Goup06b], dont on a introduit des exemples dans ce qui suit.

II.2.4.2. Plan factoriel fractionnaire

Comme les plans factoriels complets, les plans factoriels fractionnaires possèdent des facteurs ayant chacun deux niveaux, un niveau bas et un niveau haut mais on ne réalise pas toutes les combinaisons de niveaux. En effet, le nombre d'essais des plans factoriels complets augmente rapidement avec le nombre de facteurs. Cette technique permet de réduire considérablement le nombre d'expérience (essais) à réaliser donc permet d'étudier beaucoup de facteurs et de déterminer ceux qui sont influents. On sélectionne une fraction des essais d'un plan complet pour construire un plan fractionnaire. Cette sélection est basée sur des considérations mathématiques [Goup06a, Fauc06].

L'idée consiste à réduire le nombre d'essais en utilisant un plan complet d'ordre inférieur au nombre de facteurs à étudier et en se servant des interactions entre les facteurs de ce plan complet pour étudier les facteurs supplémentaires. De tels plans factoriels fractionnaires à deux

niveaux seront noté 2^{k-m} où k représente le nombre de facteurs étudiés et m la différence entre le nombre de facteurs étudiés et le nombre de facteurs du plan complet utilisé. Si on prend par exemple, un plan complet 2^4 de 16 essais, on peut n'exécuter que 8 essais, c'est-à-dire la moitié des essais. Le plan fractionnaire correspondant est un plan 2^4 divisé par 2, soit un plan $2^4/2 = 2^{4-1}$. La signification des termes de la dénomination 2^{4-1} est la suivante : le 2 indique que les facteurs prennent chacun deux niveaux, le 4 signifie que l'on étudie 4 facteurs. Enfin, $4 - 1 = 3$ que signifie que l'on utilise un plan analogue au plan factoriel complet 2^3 qui ne comprend que 8 essais.

II.2.4.3. Plan de Taguchi

La méthode d'utilisation des plans d'expériences préconisée par Taguchi a été conçue dans le but d'améliorer les performances des processus et des produits soumis à l'influence de nombreux facteurs. C'est une méthode puissante et efficace pour résoudre des problèmes de qualité difficiles. En fait, la méthode Taguchi a été utilisée avec succès dans plusieurs applications industrielles comme l'optimisation des processus de fabrication ou la conception de composants électriques / mécaniques [Li05, Yang06, Liao08]. Les plans de Taguchi sont des plans factoriels fractionnaires prenant en considération certaines interactions jugées importantes et abandonnant la plupart d'autres [Gill97, Fauc06]. Taguchi propose des plans fractionnaires orthogonaux appelés « tables standards » permettant de résoudre la plupart des problèmes. Avec les tables standards, Taguchi présente des graphes linéaires permettant une utilisation facile de ces tables. Les graphes linéaires sont des représentations graphiques du modèle que l'on souhaite identifier [Gill97].

II.2.5. Principaux avantages et inconvénients des plans d'expériences

La méthode *DoE* présente de nombreux avantages dont les principaux sont : la diminution du nombre d'essai, la possibilité d'étudier un grand nombre de facteurs, la détection des interactions entre facteurs, la modélisation des réponses étudiées et une précision optimum des résultats. Comme elle présente l'avantage d'étudier et varier plusieurs facteurs à la fois et simultanément.

Comme toute autre méthode de caractérisation et de modélisation, L'inconvénient principal de cette méthode réside dans le choix du nombre et de l'emplacement des points expérimentaux à réaliser.

II.3. Technique de criblage

On examine un plan factoriel complet par l'insertion d'un exemple réel d'étude utilisé dans notre recherche appliquée aux systèmes photovoltaïques. Dans ce contexte, on cherche à modéliser la puissance maximale délivrée par un module photovoltaïque en fonction de deux facteurs quantitatifs : l'éclairement et la température. On peut alors disposer à la fois

d'estimations fiables des paramètres traduisant l'effet de ces facteurs et d'un modèle prédictif précis défini sur le domaine d'étude de la figure II.6.

Dans un premier temps, une étude de planification expérimentale est faite : le choix de la réponse, le choix des facteurs, le choix du plan d'expérience, le nombre de points à étudier et son emplacement dans le domaine d'étude pour ressortir le modèle mathématique correspondant. Cette étape de planification est suivie directement par la réalisation des expériences choisies par l'expérimentateur.

Dans une seconde étape, un processus de calcul et de simulation est fait pour aboutir aux coefficients décrivant le modèle mathématique de la réponse. Plus de détails sur cette planification expérimentale est largement discuté et analysé dans les chapitres III et IV.

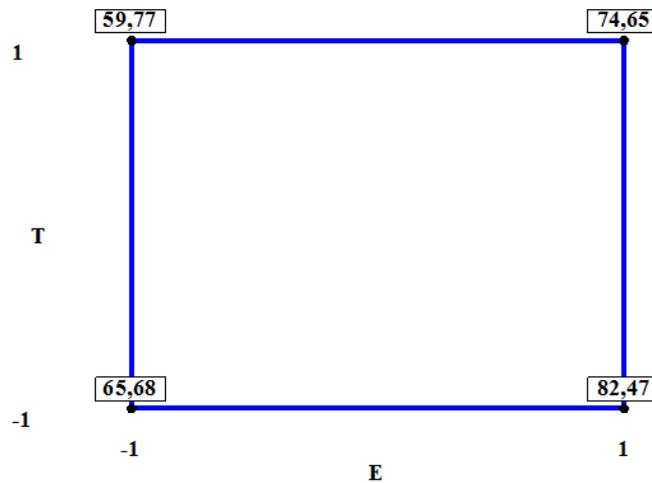


Fig. II.6. Plan factoriel complet avec valeur de réponse

Le calcul des effets moyens, de la moyenne des réponses ainsi que les interactions est simplifié par l'utilisation de la matrice des essais exprimée par le tableau 2.1 suivant :

Table 2.1. Matrice des essais d'un exemple de plan factoriel complet

N° de l'essai	Moyenne	x_1 (Eclairage)	x_2 (Température)	x_{12} (Interaction)	Réponse (Puissance)
1	+1	-1	-1	+1	$y_1 = 65,68$
2	+1	+1	-1	-1	$y_2 = 82,47$
3	+1	-1	+1	-1	$y_3 = 59,77$
4	+1	+1	+1	+1	$y_4 = 74,65$
Effet	E_0	E_1	E_2	E_{12}	

Les facteurs choisis dans cet exemple, c'est à dire l'éclairage et la température ; leurs niveaux spécifiques haut et bas sont mentionnés dans la table 2.2.

Table 2.2. Niveaux des facteurs

Niveaux	Niveau bas	Niveau haut
Facteurs	-1	+1
Eclairement E (W/m^2)	800	1000
Température T ($^{\circ}C$)	25	45

Il est maintenant possible d'estimer les paramètres à partir de la matrice d'expérience. Le signe des facteurs est reporté dans la matrice des essais du tableau 2.1 de même que les colonnes des moyennes de signe "+" puis celles des interactions par la règle du produit des signes des facteurs. Grace à ce tableau et à partir de l'ensemble des réponses, on calcule l'effet des différents facteurs, de l'interaction et de la moyenne des réponses. L'équation II.4 donne le calcul de l'effet du facteur 1, noté E_1 :

$$E_1 = \frac{-y_1 + y_2 - y_3 + y_4}{4} \quad (\text{II.4})$$

L'utilisation de variables centrées réduites permet d'obtenir directement la valeur des effets à partir de la matrice d'expériences en multipliant la transposée de la colonne associée au facteur considéré avec la colonne du critère obtenu pour chacune des expériences et en divisant par le nombre d'essais [Fauc06]. On refait le calcul de la même façon pour calculer l'effet du facteur 2 et celui de l'interaction E_{12} .

A cette étape du processus, deux moyennes sont calculées :

- ❖ La moyenne des réponses au niveau haut du facteur x_1 :

$$\bar{y}|_{1000} = \frac{y_2 + y_4}{2} = \frac{82,47 + 74,65}{2} = 78,56$$

- ❖ la moyenne des réponses aux niveaux bas du facteur x_1 :

$$\bar{y}|_{800} = \frac{y_1 + y_3}{2} = \frac{65,68 + 59,77}{2} = 62,725$$

A partir des valeurs des deux moyennes calculées précédemment, l'équation II.4 donnant l'effet d'un facteur s'énoncera par :

$$E_1 = \frac{1}{2}(\bar{y}|_{1000} - \bar{y}|_{800}) = \frac{1}{2}(78,56 - 62,725) = 7,92 \quad (\text{II.5})$$

La moyenne des réponses est la somme des réponses divisée par le nombre d'essais. Elle présente la moitié de la somme de la moyenne des réponses entre les niveaux haut et bas du facteur. Donc, elle correspond bien à la valeur centrale qui correspond aux niveaux zéro des deux facteurs et elle vaut :

$$E_0 = \bar{y} = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4} = \frac{1}{2}(\bar{y}|_{1000} + \bar{y}|_{800}) = \frac{1}{2}(\bar{y}|_{45} + \bar{y}|_{25}) \quad (\text{II.6})$$

On peut écrire l'effet d'un facteur d'une autre façon, en introduisant la valeur moyenne tel que la différence entre la moyenne des réponses aux niveaux haut du facteur et la moyenne des réponses et égale aussi à la différence entre la moyenne des réponses et la moyenne des réponses au niveau bas du facteur comme donné par l'équation II.7:

$$E_1 = \bar{y}|_{1000} - \bar{y} = \bar{y} - \bar{y}|_{800} \quad (\text{II.7})$$

De la même façon pour le facteur 2, l'effet du facteur x_2 est la moitié de la différence entre la moyenne au niveau haut et la moyenne au niveau bas. Dans notre exemple, nous obtenons ;

$$E_2 = \frac{1}{2}(\bar{y}|_{45} - \bar{y}|_{25}) = \frac{1}{2}(67,21 - 74,68) = -3,43 \quad (\text{II.8})$$

et l'on en déduit :

$$\bar{y}|_{45} = \frac{y_3 + y_4}{2} = \frac{59,77 + 74,65}{2} = 67,21$$

$$\bar{y}|_{25} = \frac{y_1 + y_2}{2} = \frac{65,68 + 82,47}{2} = 74,68$$

Par définition, l'effet d'un facteur est la moitié de la différence entre la moyenne des réponses quand le facteur est au niveau haut et la moyenne des réponses quand le facteur est au niveau bas. D'une façon générale, l'effet du facteur 2 devient :

$$E_2 = \bar{y}|_{45} - \bar{y} = \bar{y} - \bar{y}|_{25} \quad (\text{II.9})$$

L'effet d'interaction de la température sur l'éclairage, nommée ici « interaction température/éclairage » entre les facteurs 1 et 2 est défini comme étant la moitié de la différence entre l'effet de l'éclairage lorsque la température est au niveau haut et l'effet de l'éclairage lorsque la température est au niveau bas :

$$E_{12} = \frac{1}{2} \left(\frac{y_4 - y_3}{2} - \frac{y_2 - y_1}{2} \right) = \frac{1}{2}(8,395 - 7,44) = 0,477 \quad (\text{II.10})$$

Les précédents calculs des réponses et de leurs moyennes nous permet alors de formaliser les effets individuels des facteurs, à savoir dans notre exemple :

L'effet du facteur éclairage au niveau haut de la température :

$$E_E|_{45} = \frac{y_4 - y_3}{2} = 8,395$$

L'effet du facteur éclairage au niveau bas de la température :

$$E_E|_{25} = \frac{y_2 - y_1}{2} = 7,44$$

De la même façon, il est nécessaire de montrer que l'interaction de la température sur l'éclairage notée E_{12} est égale à l'interaction de l'éclairage sur la température E_{21} , soit :

$$E_{21} = \frac{1}{2} \left(\frac{y_4 - y_2}{2} - \frac{y_3 - y_1}{2} \right) = \frac{1}{2}(-2,955 + 3,91) = 0,477 \quad (\text{II.11})$$

avec dans notre exemple :

L'effet du facteur température au niveau haut de l'éclairément :

$$E_T|_{1000} = \frac{y_4 - y_2}{2} = -2,955$$

L'effet du facteur température au niveau bas de l'éclairément :

$$E_T|_{800} = \frac{y_3 - y_1}{2} = -3,91$$

A partir de ces définitions les différents paramètres de l'analyse statistique principale de cette étude sont ainsi définis.

Le tableau 2.3, résume les moyennes des réponses calculées aux niveaux haut et bas du facteur 1 et 2 comme suit :

Table 2.3. Exemple de calcul des effets moyens d'un plan factoriel complet

$x_2 \backslash x_1$	$E = 800 \text{ W/m}^2$ ($x_1 = -1$)	$E = 1000 \text{ W/m}^2$ ($x_1 = +1$)	
$T = 25^\circ\text{C}$ ($x_2 = -1$)	$y_1 = 65,68$	$y_2 = 82,47$	$\frac{y_1 + y_2}{2} = 74,68$
$T = 45^\circ\text{C}$ ($x_2 = +1$)	$y_3 = 59,77$	$y_4 = 74,65$	$\frac{y_3 + y_4}{2} = 67,21$
	$\frac{y_1 + y_3}{2} = 62,725$	$\frac{y_2 + y_4}{2} = 78,56$	$\bar{y} = \frac{y_1 + y_2 + y_3 + y_4}{4} = 70,64$

II.3.1. Modèle mathématique de premier ordre

Pour tout plan factoriel complet de type 2^k , il faut donc calculer [Vivi02] :

- k effets principaux (moyens)
- $2^k - k - 1$ interactions
- 1 moyenne

La généralisation mathématique de l'étude des plans d'expériences se fait en général par l'utilisation de l'approche matricielle.

La matrice d'expériences se met sous forme d'une matrice carrée X d'ordre 2^k (ligne*colonne) :

$$X = \begin{bmatrix} +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

L'ensemble des réponses est transcrit par un vecteur colonne y :

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

Les effets des facteurs et les interactions sont réunis dans un seul vecteur colonne E :

$$E = \begin{bmatrix} E_0 \\ E_1 \\ E_2 \\ E_{12} \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Ce qui signifie que le vecteur des effets se calcul par :

$$E = \frac{1}{N} X' y \quad (\text{II.15})$$

La matrice X est une matrice d'Hadamard, parmi leurs propriétés, on peut citer la relation :

$$X^{-1} = \frac{1}{N} X' \quad (\text{II.16})$$

X' est la transposée de la matrice d'expérience X d'où : $X'X = N \cdot I_N$, avec I_N la matrice identité d'ordre N .

On peut donc finalement écrire la relation suivante :

$$y = X \cdot E \quad (\text{II.17})$$

La connaissance des effets permet alors de décrire la relation liant la réponse y aux valeurs des deux facteurs x_1 et x_2 .

En l'absence de donnée expérimentale reposant sur la réponse aux facteurs, la méthode *DoE* permet d'établir des relations mathématiques prédictives de la réponse y en fonction des différents facteurs impliqués notés x_i comme suit :

$$y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_k) \quad (\text{II.18})$$

Avec k nombre de facteurs

Ce modèle général, lorsque la fonction f est centrée au point $(x_1, x_2) = (0,0)$, peut être exprimé par l'utilisation du $N^{\text{ième}}$ polynôme de Taylor :

$$y = f(x_1, x_2) = f(0,0) + \frac{1}{1!} \left[\frac{\partial f(0,0)}{\partial x_1} x_1 + \frac{\partial f(0,0)}{\partial x_2} x_2 \right] + \frac{1}{2!} \left[\frac{\partial^2 f(0,0)}{\partial x_1^2} x_1^2 + \frac{\partial^2 f(0,0)}{\partial x_1 \partial x_2} x_1 x_2 + \frac{\partial^2 f(0,0)}{\partial x_2 \partial x_1} x_2 x_1 + \frac{\partial^2 f(0,0)}{\partial x_2^2} x_2^2 \right] + \dots \quad (\text{II.19})$$

En considérant les dérivés dans l'équation II.19 comme des constantes, l'équation II.18 prend la forme suivante d'un modèle en régression linéaire [Rabi07, Goup13, Hann13, Char14] :

$$y = a_0 + \sum_{i=1}^k a_i x_i + \sum_{i=1}^{k-1} (\sum_{j=i+1}^k a_{ij} x_i x_j) + \sum_{i=1}^k a_{ii} x_i^2 \quad (\text{II.20})$$

Dans l'équation II.20, les niveaux assignés, x_i et x_j des facteurs i et j ($i, j = 1, 2, \dots, k$: nombre de facteurs) sont les valeurs des coordonnées des facteurs spécifiques choisis par l'expérimentateur pour effectuer un essai. Il est supposé que ces facteurs sont déterminés sans erreur. Dans cette même équation II.20, les coefficients de ce modèle mathématique a_0 , a_i , a_{ij} , a_{ii} désignent respectivement le coefficient constant, les coefficients d'ordre un par rapport à l'effet principal des facteurs, les coefficients représentant les interactions entre plusieurs facteurs et les coefficients des termes du second degré. Tous ces coefficients ne sont pas initialement connus et doivent être calculés à partir des mesures issues d'un nombre d'essais expérimentaux.

L'effet principal d'un facteur nous renseigne à la fois sur l'importance de l'influence et le poids de ce facteur sur la réponse (plus sa valeur absolue est importante et plus il est influent) et sur la direction de variation ; la réponse et le facteur varient dans la même direction si a_i est positif et dans des directions différentes si au contraire si a_i est négatif. L'expérimentateur pourra donc faire une hiérarchisation de l'influence des facteurs sur la réponse. Il pourra notamment connaître le facteur le plus influent. Cette hiérarchisation est présentée par les logiciels des plans d'expériences à l'aide de deux diagrammes : l'histogramme des coefficients du modèle et une représentation donnant la contribution de chacun d'eux en termes de pourcentage. Les a_{ij} donnent, quant à eux, une mesure des effets d'interactions d'ordre deux entre facteurs. L'expression que nous avons choisie est celle adoptée dans la plus part des plans d'optimisation dite "plans pour surfaces de réponses". Il est démontré que toute interaction ne peut pas être obtenue si l'on utilise l'ancienne méthode dite "un facteur à la fois" et qui consiste à faire varier un seul facteur tout en maintenant les autres à des valeurs constantes [Char14].

Dans sa forme hyper-volume, l'équation II.20 est représentée par :

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,1} & x_{2,1} & x_{1,1} * x_{2,1} & \cdot & x_{1,1}^2 & x_{i,1}^2 \\ 1 & x_{1,2} & x_{2,2} & x_{1,2} * x_{2,2} & \cdot & x_{1,2}^2 & x_{i,2}^2 \\ 1 & x_{1,3} & x_{2,3} & x_{1,3} * x_{2,3} & \cdot & x_{1,3}^2 & x_{i,3}^2 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 1 & x_{1,n} & x_{2,n} & x_{1,n} * x_{2,n} & \cdot & x_{1,n}^2 & x_{i,n}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ a_n \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Que nous pouvons aussi écrire comme :

$$y = X.a \quad (\text{II.22})$$

Avec, les termes y représentent les réponses individuelles enregistrées pour les N essais dans le domaine expérimental, a est le vecteur des p coefficients correspondants à calculer et X est

la matrice du modèle qui est aussi appelée, dans la théorie *DoE*, la matrice d'expérience. Nous trouverons dans cette matrice carrée inversible :

- Dans la première colonne, la moyenne des réponses au centre du domaine expérimental ;
- Dans les deuxième et troisième colonnes, les valeurs centrées réduites des niveaux affectés aux facteurs x_1 et x_2 ... (dans notre cas 2 facteurs : éclairage et température) ;
- Dans la quatrième colonne, l'interaction entre les différents facteurs ;
- et enfin, dans les deux dernières colonnes, le second degré des valeurs centrées réduites des facteurs x_1 et x_2 .

Ce modèle expérimental d'ordre un correspond au "modèle postulé généré par quatre essais expérimentaux". Avec seulement quatre essais expérimentaux, nous obtenons un plan factoriel complet, noté " 2^2 ", composé de deux facteurs ayant chacun deux niveaux. Ainsi, dans ce plan factoriel 2^2 , les points limites expérimentaux, qui ne sont autres que les sommets du domaine d'étude, sont choisis de manière à ce qu'un maximum d'autres points expérimentaux soit à l'intérieur du domaine expérimental. En conséquence de ce choix du domaine, tous les points expérimentaux dans la procédure qui seront en dehors du domaine d'étude délimité et sélectionné seront exclus.

Nous reviendrons sur la conséquence de cet effet dans ce qui suit, en particulier son effet sur la précision de la méthode *DoE*. Néanmoins, dans l'étape initiale actuelle de la procédure, le plan factoriel 2^2 est régi par le «modèle prédit» basé sur l'équation suivante :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 \quad (\text{II.23})$$

A l'aide du modèle prédit représenté par un plan factoriel complet 2^2 de l'équation II.23, les suppositions suivantes peuvent être faites :

- Il existe un « effet moyen a_0 » traduisant le fait que si tous les facteurs sont au niveau zéro ($x_1=x_2=0$), x_1, x_2 coordonnées expérimentales des facteurs en valeurs centrées réduites alors la réponse est au centre,
- Ils existent deux facteurs qui présentent divers effets simples a_1, a_2 influençant directement la réponse mesurée,
- Il existe un effet d'interaction a_{12} entre les deux facteurs agissant simultanément sur la réponse désignée.

A partir de l'équation II.22, les coefficients du modèle peuvent être facilement estimés par :

$$a = X^{-1}y \quad (\text{II.24})$$

L'équation II.24 détermine le vecteur des coefficients. En ce moment, il nous reste qu'à remplacer ces valeurs dans l'équation II.23 aboutissant au modèle prédictive du premier ordre puis on calcule les réponses pour différents niveaux de facteurs. La connaissance des effets permet alors d'écrire la relation liant la réponse y aux valeurs des deux facteurs x_1 et x_2 . Le modèle utilisé prend en compte les interactions entre les facteurs.

Si dans un plan d'expérience, il existe une égalité entre le nombre de réponse N (nombre de ligne de la matrice d'expériences) et le nombre de coefficients p du polynôme choisi (nombre de colonnes de la matrice d'expériences) ce plan d'expérience sera dit saturé. Dans ce plan saturé, le modèle passe exactement par tous les points d'expériences. Cependant, les valeurs calculées \hat{y} se confondent avec celles des réponses mesurées y .

Comme indiqué par *Tinsson* [Tins10], les modèles du premier ordre, équation II.23, n'expliquent pas toujours le phénomène étudié puisqu'ils n'incluent pas les termes quadratiques qui représentent la surface de la réponse ce qui permet d'ajuster le modèle à un modèle à deux ordres capable de donner cette information.

II.3.2. Analyses statistiques

Les plans factoriels permettent d'évaluer l'influence des facteurs et leurs interactions grâce aux coefficients du modèle prédit. L'importance des coefficients est jugée en les comparant entre eux pour indiquer enfin ceux qui devaient être conservés et ceux qui pouvaient être éliminés du modèle mathématique prédit. L'analyse statistique peut y répondre par l'analyse de la variance.

II.3.2.1. Analyse de variance

L'analyse de la variance, appelée « **AN**alysis **Of** **VA**riance » dans la littérature anglo-saxonne est couramment abrégée en **ANOVA**. Elle utilise la mesure de variance pour juger le caractère significatif ou non d'un facteur. D'une façon générale, le principe de l'analyse de la variance est de subdiviser la variation totale en une composante factorielle (expliquée) relative à l'équation de régression ou au modèle prédit, et une composante résiduelle. Les composantes factorielle et résiduelle seront mathématiquement représentées par des carrés moyens, c'est-à-dire des variances [Droe97, Vivi02].

L'intérêt de l'analyse de la variance est de pouvoir tester de manière absolue l'influence des facteurs sur les variations d'une réponse donnée [Vivi02, Rabi07].

II.3.2.1.1. Variance de la composante factorielle

La variance de la composante factorielle est tout simplement la variance des facteurs et des interactions. La variance des facteurs et des interactions s'obtient en calculant la *somme des carrés des écarts (SCE)* que l'on divise par le nombre de degré de liberté (*ddl*) associé.

➤ Pour les facteurs

Le nombre de degré de liberté d'un facteur ddl_f est le nombre de niveaux (n) qu'il prend dans un plan d'expérience, minoré de un [Anto14], c'est-à-dire :

$$n_f = n - 1$$

La somme des carrés des écarts associés au facteur f mentionnée par l'équation II.25 vaut :

$$SCE_f = \gamma_f \sum_{i=1}^{n_f} (E_f|_{f=i})^2 = \gamma_f \sum_{i=1}^{n_f} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{II.25})$$

Avec :

$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n y_i$ la moyenne des réponses,

$\gamma_f = \frac{N}{n_f}$ le nombre d'expériences pour lesquelles le facteur f prend un de ses n niveaux,

\bar{y}_i la moyenne des réponses observées pour les expériences où le facteur f prend son $i^{\text{ème}}$ niveau.

➤ Pour les interactions

Le nombre de ddl associés à une interaction de facteur correspond au produit des ddl des facteurs mis en jeu dans cette interaction, soit :

$$ddl_{f,g,\dots,l} = ddl_f \times ddl_g \times \dots \times ddl_l$$

Pour les interactions mettant en jeu 2 facteurs f et g , la somme des carrés des écarts vaut :

$$SCE_{fg} = \delta_{fg} \sum_{i=1}^{n_f} \sum_{j=1}^{n_g} (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_i - \bar{y}_j + \bar{y})^2 \quad (\text{II.26})$$

Avec :

$\delta_{fg} = \frac{N}{n_f \cdot n_g}$ le nombre d'expériences pour lesquelles le facteur f prend un de ces n_f niveaux et lorsque le facteur g adopte un de ces n_g niveaux,

\bar{y}_{ij} la moyenne des réponses observées pour les expériences où le facteur f prend son $i^{\text{ème}}$ niveau et où le facteur g prend son $j^{\text{ème}}$ niveau.

On déduit alors la valeur des carrés moyens, associés au facteur ou à l'interaction considéré (e) x , comme étant :

$$CM_x = \frac{SCE_x}{ddl_x} \quad (\text{II.27})$$

Pour deux facteurs on peut écrire la décomposition suivante :

$$y_{ij} - \bar{y} = (\bar{y}_i - \bar{y}) + (\bar{y}_j - \bar{y}) + (y_{ij} - \bar{y}_i - \bar{y}_j + \bar{y}) \quad (\text{II.28})$$

On réalise alors une somme sur i et j , des deux côtés de l'égalité mis préalablement au carré. La somme se fait ainsi sur les niveaux de tous les facteurs. On aboutit alors à l'équation

de la variance II.29 qui n'est que l'additivité des sommes carrés des écarts des facteurs et de l'interaction (à droite de l'égalité) :

$$SCT_t = \sum_{i=1}^{n_i} \sum_{j=1}^{n_j} (y_{ij} - \bar{y})^2 = SCE_x \quad (\text{II.29})$$

Avec

SCT_t la somme totale des carrés des écarts ;

SCE_x la somme factorielle des carrés (x désignant un facteur ou une interaction).

Notons que la relation donnant la valeur de nombre de degré de liberté ddl_t total est donnée par la formule II.30 suivante :

$$ddl_t = \sum_{facteurs} ddl + \sum_{interaction} ddl \quad (\text{II.30})$$

Les N réponses mesurées sont toutes indépendantes les unes des autres et aucune relation mathématique n'existe entre elles. Elles possèdent donc N degrés de liberté. Un degré de liberté est utilisé pour calculer la moyenne des réponses.

Le nombre ddl aussi s'additionne (ddl_f et ddl_r), le cas des plans orthogonaux le nombre total de ddl_t est adopté à $(N - 1)$ [Vivi02, Goup06a].

II.3.2.1.2. Variance de la composante résiduelle

En revanche, lorsqu'il existe une erreur expérimentale non nulle, l'équation de la variance fait apparaître un nouveau terme appelé communément variance résiduelle. La nouvelle équation de la variance totale devienne :

$$SCT_t = SCE_x + SCE_r \quad (\text{II.31})$$

Les SCE_x sont alors comparés à cette variance résiduelle SCE_r afin de déterminer les caractères significatifs des facteurs et des interactions x . La variance résiduelle est donc un point de comparaison. Elle doit traduire une variation des valeurs de réponse, dont l'amplitude est arbitrairement considérée comme faible. Tout facteur influent doit donc posséder des caractéristiques fortement différenciées de celles de cette composante [Vivi02, Rabi07].

La variance résiduelle est le plus souvent calculée comme étant la somme des carrés des résidus, *i.e.* des écarts entre les réponses mesurées (y_i) et les réponses correspondantes, calculées grâce au modèle (\hat{y}_i) [Schi98, Vivi02].

$$SCE_r = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{II.32})$$

Le nombre de degré de liberté associé aux résidus (ddl_r) vaut : $(N - p)$.

On comprend, en effet que les écarts n'existent que grâce aux N expériences réalisées avec $N > p$, pour les p coefficients du modèle.

$$CM_r = \frac{SCE_r}{ddl_r} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{N-p} \quad (\text{II.33})$$

Calculer le SCE_r de cette façon permet, en définitive, de tester le caractère significatif des facteurs et des interactions et dans le même temps d'évaluer la qualité du modèle utilisé [Vivi02, Rabi07].

Les résidus ont des valeurs non nulles qui doivent être considérées comme des termes d'erreur, ils correspondent par définition à la partie de la mesure non explicable par le modèle. Les causes de leur existence sont diverses : citons les variations des facteurs non contrôlés pendant l'expérimentation, l'imprécision de la méthode de mesure et un éventuel mauvais choix du modèle [Hoin09].

II.3.2.1.3. Test de Fisher-Snedecor

Le test de Fisher-Snedecor donne une information sur le modèle, si le modèle établi est une relation vraie entre la variation de la réponse et les facteurs, ou bien dû à une fluctuation aléatoire de la réponse dans le domaine d'étude.

Le rapport F_{obs} exprime le rapport entre deux variances, il prend en compte le nombre de degré de liberté de chacune des deux variances. Les variances concernées doivent être celles de variables aléatoires suivant une distribution normale et à variance constante. La statistique F_{obs} est elle-même une variable aléatoire dont les valeurs suivent une fonction de répartition théorique, dite de Fisher où Loi F [Kara04, Rabi07].

Pour effectuer ce test on calcule le ratio suivant pour le terme du modèle considéré (facteur ou interaction) :

$$F_{obs} = \frac{CM_x}{CM_r} \quad (\text{II.34})$$

La variance associée au facteur ou à l'interaction étudié(e) (CM_x) peut être considérée comme égale à la variance résiduelle (CM_r), si le rapport F_{obs} est faible c'est à dire si inférieur à une valeur seuil statistique. On définit l'hypothèse statistique du test Fisher-Snedecor H_0 , selon laquelle l'affirmation précédente est vraie. Si c'est le cas, F_{obs} est alors une valeur observée d'une variable F de Fisher-Snedecor, à ddl_f et ddl_r degrés de liberté.

Pour cela l'hypothèse statistique du test Fisher-Snedecor H_0 , qui stipule que « le modèle ne permet pas de décrire la variation des résultats d'essais » [Fau06]. On utilise cette loi pour savoir à partir de quelle valeur particulière, appelée « valeur critique » notée α , le numérateur de la quantité F_{obs} est significativement supérieur au dénominateur.

Comme, on peut également à partir de cette même fonction de répartition affecter une probabilité P de rejeter l'hypothèse nulle H_0 . Cette probabilité sera comparée au seuil de significativité choisi : La technique est considérée comme applicable si cette probabilité est dessous de 5%, nous n'aurons pas raison de rejeter le modèle.

L'hypothèse H_0 doit être rejetée lorsque :

$$P(F \geq F_{obs}) \leq \alpha \tag{II.35}$$

Tous les calculs réalisés ainsi obtenues peuvent être résumées dans un tableau d'analyse de variance dont la structure est donnée dans la table 2.4.

Table 2.4. Analyse de la variance d'un plan factoriel complet

Source de variation	ddl	Somme des carrés des écarts	Carrés moyens	Loi F	Probabilité
Facteur 1	ddl_1	SCE_1	SCE_1/ddl_1	CM_1/CM_r	$P(F \geq F_{obs})$
.....	
Facteur f	ddl_f	SCE_f	SCE_f/ddl_f	CM_f/CM_r	
.....	
Facteur k	ddl_k	SCE_k	SCE_k/ddl_k	CM_k/CM_r	
Interaction fg	ddl_{fg}	SCE_{fg}	SCE_{fg}/ddl_{fg}	CM_{fg}/CM_r	
.....				
Variation résiduelle	ddl_r	SCE_r	SCE_r/ddl_r		
Totaux	ddl_t	SCE_t			

Ces résultats permettent donc de déterminer la significativité des facteurs et des interactions. Dans le cas de non significativité, les termes concernés peuvent être exclus du modèle. Il est alors préférable de refaire une analyse de variance afin de s'assurer que tous les éléments restants sont bien significatifs.

II.3.2.2. Synthèse logicielle

Nous savons que le calcul des différents paramètres intervenant dans l'analyse de la variance prend un temps important, d'où la nécessité d'utiliser des logiciels de calculs garantissant la qualité de calcul ainsi que toutes les variables nécessaire pour cette analyse. Dans notre travail de thèse nous avons ainsi utilisé deux logiciels distincts spécialisés dans le calcul statistique et plus précisément dans les plans d'expériences. Ces deux logiciels sont le JMP (version 7) et le MINITAB (Version 16).

L'ensemble des variables déjà établie statistiquement sont données sous forme d'un tableau, donné par la figure II.7 qui est une fenêtre capturée du logiciel utilisé, constitué de six colonnes :

Première colonne : Indique la source de variation, on trouve le modèle de régression et les résidus,

Deuxième colonne : Indique le nombre de degré de liberté de chaque somme de carrés, on remarque que la somme de *ddl* du modèle de régression et des résidus est égale au degré de liberté total (correspond aux réponses mesurées),

Troisième colonne : Donne la somme des carrés des écarts corrigés de la moyenne (Total), également c'est la somme des deux sommes des carrés des écarts,

Quatrième colonne : Présente les carrés moyens, qui sont les sommes des carrés des écarts divisées par les *ddl*.

Cinquième colonne : Indique le *F* de Fisher qui est le rapport du carré moyen du modèle à celui des résidus.

Sixième colonne : Donne la probabilité *P* qui se calcule à partir de *F* de Fisher. Si F_{obs} est proche de 1 (forte probabilité que le modèle soit celui de la moyenne), les variations des réponses mesurées sont comparables à celles des résidus. Si F_{obs} est élevé (faible probabilité que le modèle soit celui de la moyenne), les variations des réponses mesurées sont bien dues aux variations des facteurs.

Predictor	Coef	SE Coef	T	P
Constant	70,6425	0,4775	147,94	0,004
E	7,9175	0,4775	16,58	0,038
T	-3,4325	0,4775	-7,19	0,088

S = 0,955 R-Sq = 99,7% R-Sq(adj) = 99,1%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	2	297,88	148,94	163,30	0,055
Residual Error	1	0,91	0,91		
Total	3	298,79			

Fig. II.7. Capture d'écran des résultats de l'analyse de la variance du software de l'exemple étudié

II.3.3. Analyse graphique

L'analyse graphique est le second moyen de présenter les résultats obtenus par la technique de criblage. Cette analyse permet de tracer les effets des facteurs contribuant dans l'étude et ainsi que les différentes interactions entre eux en exploitant les données expérimentales de l'exemple étudié ci-dessus (§ II.3).

I.3.3.1. Effets propres des facteurs

Les effets des facteurs sur la réponse puissance maximale peuvent être représentés par la figure II.8 ci-dessous :

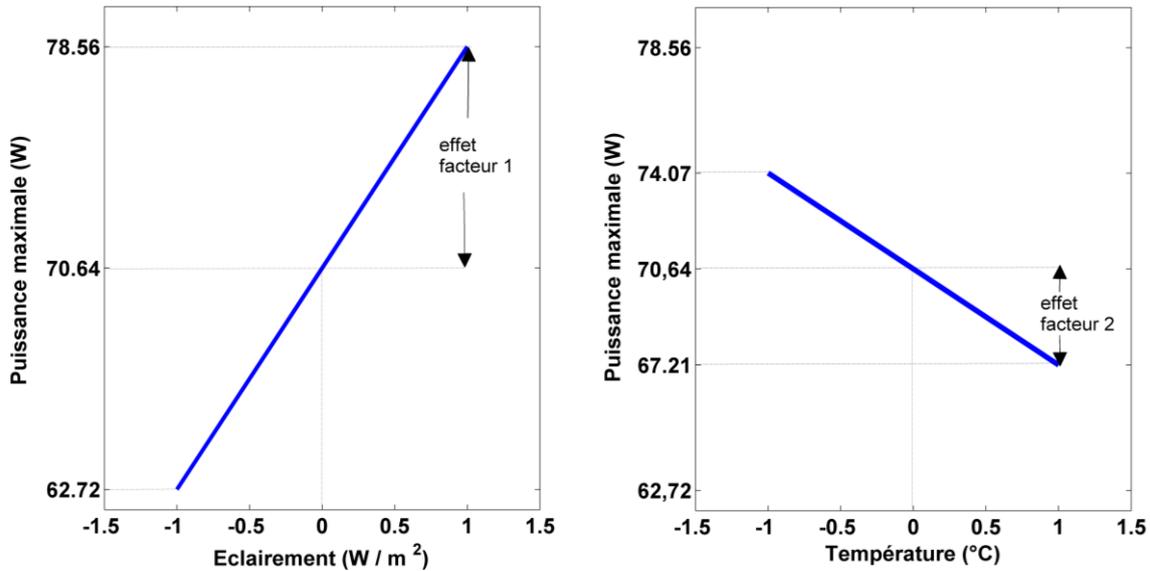


Fig. II.8. Présentation graphique des effets des facteurs, à gauche l'effet du facteur 1 et à droite l'effet du facteur 2

Graphiquement, l'effet d'un facteur est la différence entre la moyenne des réponses au niveau haut du facteur et la moyenne des réponses (effet facteur 1) ou ainsi la différence entre la moyenne des réponses et la moyenne des réponses au niveau bas du facteur (effet facteur 2). Ce graphique illustre l'influence de la variation de chacun des facteurs sur la réponse étudiée. Cette visualisation nous permet d'observer simplement les effets du passage d'un facteur d'un état milieu à un état haut ou d'un état milieu à un état bas [Gime08].

I.3.3.2. Effets d'interactions entre facteurs

Dans le but de déterminer s'il existe une interaction entre les deux paramètres de processus ou non, on peut utiliser un outil graphique simple mais puissant appelé graphes d'interaction. Si les lignes du graphique d'interaction sont parallèles, donc aucune interaction n'est existée entre les paramètres du processus [Anto14]. Cela implique que la variation de la réponse moyenne d'un niveau bas à un niveau haut d'un facteur ne dépend pas du niveau de l'autre facteur. En revanche, si les lignes ne sont pas parallèles, il y a une interaction entre les facteurs. Plus le degré d'écart par rapport au parallèle est grand, plus l'effet d'interaction est fort [Anto14].

L'effet d'interaction de la température sur l'éclairement ou interaction température/éclairement E_{12} ou celui entre l'éclairement et la température est défini comme étant la moitié de la différence entre l'effet de l'éclairement lorsque la température est au niveau haut et l'effet de l'éclairement lorsque la température est au niveau bas, et vice versa pour l'interaction de l'éclairement sur la température E_{21} , comme le montre la figure II.9.

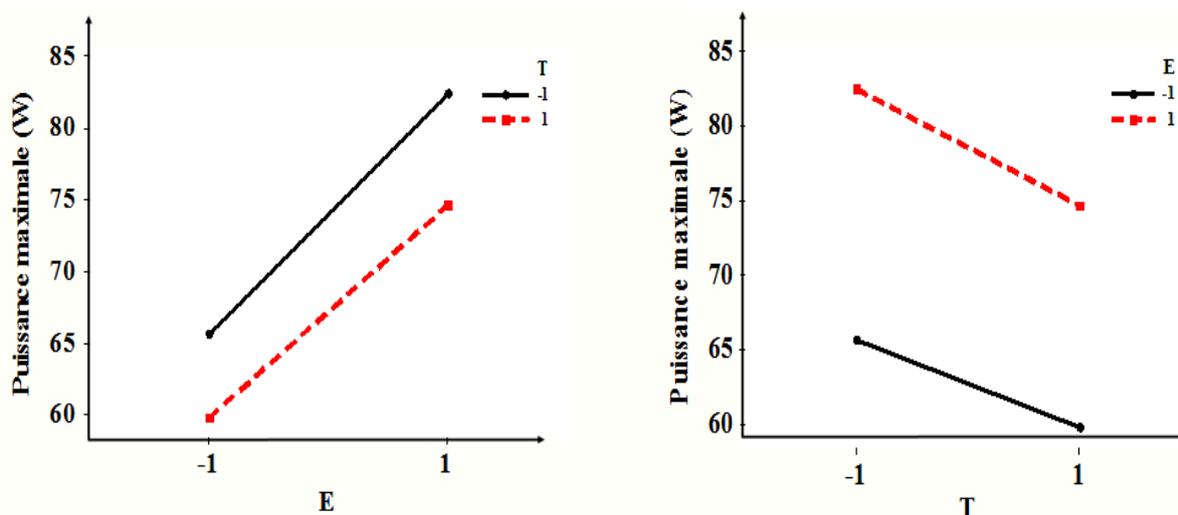


Fig. II.9. Effet d'interactions entre facteurs, à gauche E_{12} et à droite E_{21}

Il existe d'autres méthodes de représenter graphiquement les effets des facteurs et des interactions, les données peuvent être représentées par un histogramme, pour lequel chaque barre à une valeur proportionnelle à la valeur de l'effet correspondant. En effet, un diagramme de Pareto peut servir aussi au tracé des effets, il permet de déterminer les facteurs influents par ordre de contribution décroissante.

Le plan de criblage est généralement réalisé sur l'ensemble du domaine d'étude : chaque facteur prend successivement les valeurs de ses bornes de variation, donc les variations non linéaires (quadratiques) de la réponse ne sont pas détectées lors d'une étude de criblage. Par ailleurs, l'étude de criblage est une étape importante car en diminuant les dimensions du problème pour toutes les études des surfaces de réponses et des optimalité.

II.4. Technique de surface de réponse

La méthodologie des surfaces de réponses (MSR) constitue la deuxième partie d'étude de la méthode des plans d'expériences. Cette technique vise à déterminer d'une façon quantitative les variations de la réponse vis-à-vis des facteurs d'influence significative, identifiés lors d'une première étude de criblage [Goup93, Vivi02]. Cela constitue donc l'analyse de la variation de la réponse.

Parmi les nombreux types de plans permettant de construire des surfaces de réponses, nous ne présenterons et n'utiliserons ici que les plans composites centrés [Fauc06]. Ils présentent l'avantage de la facilité de construction car ils sont construits en ajoutant des points de mesures à un plan factoriel complet.

Un plan composite centré est défini par :

- Un plan factoriel complet,
- n_0 répétitions au centre du domaine expérimental, dédiés à l'analyse statistique,

- Deux points en étoiles par paramètre et positionnés sur les axes de chacun de ceux-ci à une distance du centre du domaine. Ces points contribuent à l'évaluation des termes quadratiques du modèle polynomial.

Le nombre total d'essais N va dépendre du nombre de facteurs k étudiés et du nombre de répétitions au centre du domaine n_0 :

$$N = 2^k + 2 \cdot k + n_0 \quad (\text{II.36})$$

La figure II.10 représente un plan composite centré pour deux facteurs. Les points A, B, C et D sont les points expérimentaux du plan factoriel complet. Le point E est le point central, il peut avoir été répliqué n_0 répétitions. Les points F, G, H et I sont les points axiaux, ces derniers points forment ce qu'on appelle le plan en étoile.

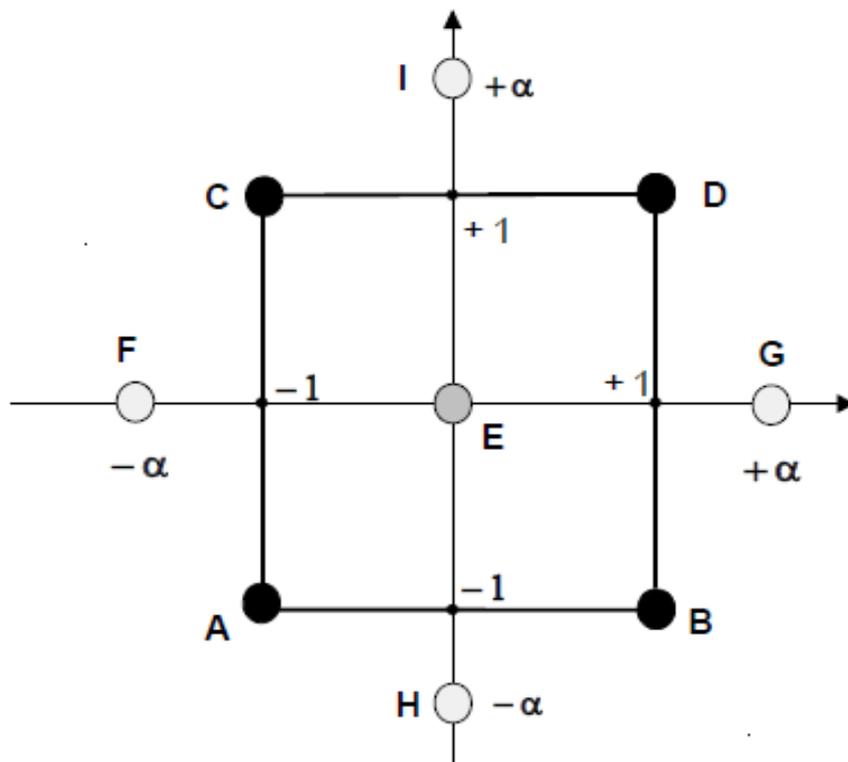


Fig. II.10. Illustration d'un plan composite centré pour deux facteurs

II.4.1. Modèle mathématique de deuxième ordre

Les plans examinés précédemment n'avaient que deux niveaux par facteur et les modèles mathématiques utilisés étaient du premier degré avec interactions par rapport à chaque facteur. Ces plans sont les plus employés car ils permettent le criblage des facteurs et conduisent à des modélisations simples mais suffisantes. Cela signifie que le modèle passe exactement par tous les points expérimentaux, c'est-à-dire que le nombre d'essais N est égal au nombre de coefficients p .

Cependant, l'égalité $N = p$ n'est qu'un cas particulier car pour les situations dans lesquelles $N > p$, les modèles utilisés ne passent pas exactement par les points expérimentaux. En effet, les coefficients de ces modèles polynomiaux sont estimés afin de minimiser le critère de moindres carrés.

Le plan expérimental de deuxième ordre correspond au «modèle mis en œuvre généré par un minimum d'essais expérimentaux». Comme ce nouveau design considère les termes du second degré, il contribue à améliorer la précision du modèle prédit. Avec maintenant la prise en compte des termes quadratiques et des résidus (écarts), le modèle mis en œuvre lié à ce plan factoriel devient :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + e \quad (\text{II.37})$$

On a alors p inconnues qui sont les coefficients a du modèle, le nombre de ces inconnues est déterminé par la formule suivante [Kar04, Fau06] :

$$p = \frac{(k+1)(k+2)}{2} \quad (\text{II.38})$$

Les valeurs résiduelles e sont les différences entre les réponses expérimentales ou mesurées et les réponses calculées prédites par le modèle. Ainsi, le système de l'équation II.37 sous sa forme matricielle s'énonce :

$$y = X.a + e \quad (\text{II.39})$$

Avec y le vecteur colonne de la réponse mesurée, X est la matrice d'expérience, a le vecteur colonne des estimations des coefficients du modèle et e le vecteur colonne des résidus.

Dans la plupart des cas, le système décrit par l'équation II.39 ne peut pas être simplement résolu du fait que le nombre d'équations est inférieur au nombre d'inconnues, c'est-à-dire les coefficients (a) et les résidus (e).

Les solutions passent par des méthodes généralement basées sur la régression multilinéaire à l'aide de l'estimation par la méthode des moindres carrés. Elle consiste à trouver une valeur estimée de $a = \hat{a}$ qui minimise la somme des carrés des résidus comme suit :

$$\sum_{i=1}^{i=k} e_i^2 = \sum_{i=1}^{i=k} [y_i - (a_0 + a_1x_{1i} + a_2x_{2i} + a_{12}x_{1i}x_{2i} + a_{11}x_{1i}^2 + a_{22}x_{2i}^2)]^2 \quad (\text{II.40})$$

Donc l'équation II.40 peut réécrire avec la formule II.41 suivante :

$$\sum_{i=1}^{i=k} e_i^2 = e'e \quad (\text{II.41})$$

où y_i est le vecteur des réponses mesurées, e et e' sont déduits de l'équation II.39 comme ($e' = y' - a'X'$) et ($e = y - Xa$)

avec X' la matrice transposée de la matrice X .

Le critère des moindres carrés nous permet alors d'obtenir les équations supplémentaires nécessaires permettant la résolution du système linéaire décrit par l'équation II.37.

Le problème est donc de résoudre le système matriciel suivant :

$$\begin{cases} y = X \cdot a + e \\ \frac{d(e'e)}{da} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

En remplaçant e et e' par leur formule, on peut alors écrire :

$$e'e = (y' - a'X')(y - Xa) = y'y - y'Xa - a'X'y + a'X'Xa \quad (\text{II.43})$$

Le second et le troisième terme sont des scalaires, nous pouvons donc les écrire :

$$(y'Xa)' = a'X'y$$

Finalement l'équation II.43 devient :

$$e'e = y'y - 2a'X'y + a'X'Xa \quad (\text{II.44})$$

Le minimum de $(e'e)$ avec a , noté \hat{a} doit satisfaire à la condition suivante [Pete12] ($y'y$ étant une constante) :

$$\frac{d(e'e)}{da} = \frac{d(y'y)}{da} - 2 \frac{d(a'X'y)}{da} + \frac{d(a'X'Xa)}{da} = 0 - 2X'y + 2X'Xa = 0 \quad (\text{II.45})$$

Conduisant à la relation suivante [Sapo06, Pete12, Goup13] :

$$X'X\hat{a} = X'y \quad (\text{II.46})$$

La matrice $X'X$ est une matrice carrée symétrique appelée « matrice d'information ». Si son déterminant est différent de zéro, nous pouvons trouver sa matrice inverse $(X'X)^{-1}$ appelée « matrice de dispersion » qui est aussi une matrice carrée et symétrique.

Enfin, les valeurs des moindres carrés \hat{a} de a peuvent être directement dérivées de l'équation II.46 donnant l'importante relation dans le domaine des plans d'expériences donnée par l'équation II.47 suivante [Lind05, Goup07, Kess18] :

$$\hat{a} = (X'X)^{-1}X'y \quad (\text{II.47})$$

La matrice \hat{a} est la matrice servant à calculer les coefficients et elle donne un bon ajustement du modèle dont la matrice de calcul X où la matrice d'expérience et le vecteur des réponses mesurées y sont connues.

II.4.2. Analyse statistique du modèle

L'estimation des coefficients du modèle permet de prévoir les réponses, il suffit d'utiliser le produit scalaire du vecteur d'estimation des coefficients par le vecteur représentant la fonction du modèle.

La mise en œuvre des tests statistiques doit permettre de porter un jugement sur les résultats obtenus à savoir :

- Un modèle décrivant la variation de la réponse dans le domaine d'étude ;
- Des estimations des coefficients associés aux différents monômes du modèle ;
- Des résidus traduisant les écarts entre les valeurs mesurées et les valeurs calculées.

L'objectif de l'analyse globale des résultats est de définir la qualité descriptive du modèle au moyen d'un tableau d'analyse de la variance (tableau ANOVA) et la significativité des coefficients (*T_Student*). Pour ce faire, plusieurs grandeurs doivent être préalablement définies.

II.4.2.1. Analyse de variance

L'analyse de régression consiste à expliquer la variation totale de la réponse à partir de la somme des carrés des écarts entre les réponses mesurées et leur moyenne :

$$SCT = \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \quad (\text{II.48})$$

Géométriquement, c'est la somme des carrés des distances verticale de chaque point à la droite de régression. La droite de régression est la droite qui minimise la somme des carrés des écarts (la droite des moindres carrés).

Cette somme totale peut être décomposée comme une somme de deux termes, *SCR*, la somme des carrés due à la régression ou variation expliquée par le modèle et *SCE*, la somme des carrés des résidus ou variation inexpliquée par le modèle :

$$SCT = SCR + SCE \quad (\text{II.49})$$

Le premier terme traduit la variation des réponses calculées autour de leur moyenne, *SCR* est défini comme étant la somme des carrés des écarts entre les réponses estimées et la moyenne des réponses mesurées :

$$SCR = \sum_{i=1}^N (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (\text{II.50})$$

On rappelle que l'application de la méthode des moindres carrés utilisée pour le calcul des coefficients du modèle, induit la relation II.51 [Rabi07] suivante :

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n y_i = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n \hat{y}_i \quad (\text{II.51})$$

Le second terme traduit la somme des carrés des résidus, dont on sait qu'elle est minimale grâce à l'utilisation de la méthode des moindres carrés, SCE est la somme du carré des écarts entre les réponses mesurées et estimées :

$$SCE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (\text{II.52})$$

De ces sommes des carrés, on déduit les carrés moyens ou les variances correspondantes en divisant par le nombre de degré de liberté de chacun.

Donc, les carrés moyens CMR dû au modèle de régression sont donnés par :

$$CMR = \frac{SCR}{p-1} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{p-1} \quad (\text{II.53})$$

Les carrés moyens CME associés aux écarts valent :

$$CME = \frac{SCE}{N-p} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{N-p} \quad (\text{II.54})$$

Le nombre de degré de liberté total est $(N - p) + p - 1 = N - 1$, qui correspond bien au nombre des essais du plan d'expériences.

La variance due à la régression (CMR) peut être considérée du même ordre que la variance résiduelle (CME), si le rapport F_{obs} est faible ; $i-e$ inférieur à un seuil statistique. On définit l'hypothèse statistique du test Fisher-Snedecor H_0 . En effet, chaque statistique F de Fisher, obtenue correspond à une source de variation.

L'hypothèse nulle H_0 que l'on veut tester est alors :

$$H_0 : \text{« La source de variation est sans effet »}$$

Contre l'hypothèse alternative :

$$H_1 : \text{« Il y a un effet dû à la source de variation »}$$

F_{obs} est alors une valeur observée d'une variable F de Fisher-Snedecor, à $(p - 1)$ et $(N - p)$ degrés de liberté.

Sous l'hypothèse H_0 : le test de Fisher-Snedecor pour le modèle considéré, est donné par le ratio :

$$F_{obs} = \frac{CMR}{CME} = \frac{\frac{SCR}{p-1}}{\frac{SCE}{N-p}} \quad (\text{II.55})$$

La probabilité critique P (en Anglais P_value) du test de Fisher est la probabilité qu'une réalisation de la loi de Fisher-Snedecor soit plus élevée que la valeur de la statistique de Fisher F_{obs} sous l'hypothèse H_0 (Annexe 1). Plus P est faible, plus les données témoignent de l'effet significatif de la source de variation étudiée. Elles nous conduisent alors à rejeter H_0 .

$$P(F \geq F_{obs}) \leq \alpha$$

Le tableau 2.5 est utilisé pour résumer l'analyse de la variance de ce modèle de surface de réponse.

Table 2.5. Analyse de régression générale

Source	Somme des carrés	Degré de liberté	Carré moyen	Loi F	Probabilité
Modèle de régression	SCR	$p - 1$	$\frac{SCR}{p - 1}$	F_{obs}	P
Résidus	SCE	$N - p$	$\frac{SCE}{N - p}$		
Total	SCT	$N - 1$			

II.4.2.2. Test de Student ($T_{Student}$)

Dans le cas où le facteur considéré ne possède que deux niveaux, l'analyse de la variance à un critère de classification équivalent au Test de Student ($T_{Student}$) [Droe97] qui permet d'analyser les coefficients intervenant dans le modèle. Le t de Student est l'un des principaux grandeurs statistiques servant à la simplification des modèles et comparaison entre les facteurs en terme de rejet ou non.

Les différents paramètres du modèle peuvent aussi être analysés statistiquement. L'hypothèse nulle (H_0) est alors étudiée pour chacun des coefficients, selon laquelle ceux-ci sont nuls. Pour ce faire, la statistique T_{obs} est le rapport du coefficient à son écart type est calculée.

$$T_{obs} = \frac{\hat{a}_i}{s(\hat{a}_i)} \tag{II.56}$$

L'écart-type ou l'erreur type des coefficients est défini à partir des termes diagonaux C_{ii} de la matrice de dispersion $(X'X)^{-1}$:

$$s(\hat{a}_i) = \sqrt{C_{ii} \sigma^2} \tag{II.57}$$

σ^2 est la variance expérimentale qui est difficilement calculable, on adopte comme estimation de la variance expérimentale, la variance résiduelle (variance des résidus), σ_r^2 définie à partir de la relation générale :

$$\sigma_r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{N - p} \tag{II.58}$$

La statistique T_{obs} peut alors être exprimée sous la forme :

$$T_{obs} = \frac{\hat{a}_i}{\sigma_r \sqrt{C_{ii}}} \tag{II.59}$$

Nous souhaitons tester l'hypothèse nulle H_0 de la forme :

$$H_0 : a_i = 0$$

L'hypothèse inverse :

$$H_1 : a_i \neq 0$$

Sous l'hypothèse H_0 , la statistique T_{obs} suit une loi de Student pour un nombre $(N - p)$ de degrés de liberté.

La propriété H_0 va alors être rejetée au niveau de signification α (Annexe 2) si :

$$|T_{obs}| > t_{1-\alpha/2}$$

Où $t_{1-\alpha/2}$ est la valeur critique

On cherche la valeur de T_{obs} pour laquelle la probabilité que $t_{1-\alpha/2}$ se situe entre $-t$ et $+t$ est égale à un certain pourcentage.

$$P(t_{1-\alpha/2} < |T_{obs}|) \leq \alpha$$

II.4.2.3. Coefficient de corrélation multiple

Le coefficient de corrélation multiple ou de détermination noté R^2 est une mesure de la qualité du modèle qui consiste en la définition du pourcentage de variation totale expliquée par le modèle [Goup06a] prenant des valeurs dans l'intervalle $[0 \ 1]$: plus R^2 est grand, meilleur sera le modèle prédit et les réponses calculées sont fortement corrélées (coïncident) avec les réponses expérimentales. Cependant, si le nombre d'expériences est égal au nombre d'inconnus du système, le coefficient R^2 sera toujours égal à 1.

Pour $R^2 = 0$, les données ne sont pas du tout alignées. Le coefficient de détermination mesure alors le degré d'alignement des données sur le modèle de régression [Fauc06].

Le coefficient de détermination R^2 est défini par :

$$R^2 = \frac{SCR}{SCT} = 1 - \frac{SCE}{SCT} \quad (\text{II.60})$$

Le R^2 est un véritable indicateur de la qualité du modèle à condition que les résidus ne soient pas nuls.

Cependant, en présence de plusieurs facteurs, ce qui est souvent le cas pour les régressions multiples, le coefficient de détermination augmente naturellement et ne permet pas de comparer significativement différents modèles [Dodg04, Fauc06]. Pour éviter cette situation, le coefficient de corrélation ajusté R^2_{adj} a été introduit. Le R^2_{adj} est défini comme la différence à 1 du rapport entre le carré moyen des résidus et le carré moyen des écarts total :

$$R^2_{adj} = 1 - \frac{\frac{SCE}{N-p}}{\frac{SCT}{N-1}} \quad (\text{II.61})$$

R^2_{adj} est maximal quand la variance des résidus (carré moyen des résidus) est minimale. La qualité du modèle sera donc d'autant meilleure que R^2_{adj} sera proche de 1.

II.4.2.4. Erreur quadratique moyenne

La racine carrée de la variance est très proche de l'erreur quadratique moyenne (Root Mean Square Error) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2} \quad (\text{II.62})$$

Cette quantité est très utilisée pour évaluer l'intérêt prédictif du modèle.

II.4.2.5. Erreur relative

Enfin, il est évident que toutes les méthodes présentent des erreurs relatives aux différences entre les données simulées et mesurées. Cependant, afin de quantifier ces erreurs et d'évaluer la précision du modèle [Fuen07, Alme17], des outils statistiques existent tels que l'erreur relative E_r . Pour valider le modèle prédit tel qu'exprimé ci-dessus, l'erreur relative (en %) est calculée par [Chen17, Lope18].

$$E_r = (y_{mod} - y_{exp}) / y_{exp} \times 100 \quad (\text{II.63})$$

où, pour une réponse considérée, y_{exp} et y_{mod} sont respectivement les valeurs expérimentales et les valeurs calculées par le modèle.

II.4.2.6. Synthèse logicielle

Les sorties du logiciel pour ce calcul donnent une matrice, qui comporte pour chaque paramètre, cinq colonnes :

Première colonne : Contient les estimations des paramètres ou coefficients du modèle (**Estimate**)

Deuxième colonne : Les écarts-types estimés des paramètres (**Std Error**)

Troisième colonne : Figure la valeur observée de la statistique de test de l'hypothèse H_0 (**t Ratio**)

Quatrième colonne : Contient la probabilité critique P , qui est la probabilité, pour la statistique de test sous H_0 , de dépasser la valeur estimées (**$P(> |t|)$**)

Cinquième colonne : Une version graphique du test : (*) signifie que le test rejette H_0 pour des erreurs $\geq 0,05$

Nous rejetons l'hypothèse H_0 pour les paramètres estimés au niveau $\alpha = 5\%$, cela permet d'effectuer un choix de variable pertinente.

II.4.3. Analyse graphique du modèle

L'analyse des résultats peut aussi se faire sous forme graphique, d'où la disponibilité de différents graphiques servant à l'interprétation des résultats obtenus par le modèle prédit. Par conséquent, il existe deux graphiques essentiels pour les études de surfaces de réponses :

II.4.3.1. Surface de réponse

La surface de réponse est montrée dans la figure II.11 sur la base de l'exemple retenu dans notre démonstration. Elle représente la surface de régression à partir d'un graphique dans un espace à trois dimensions. Le plan horizontal de la figure représente le domaine de variation des deux facteurs intervenant dans le modèle de régression et l'axe vertical présente la variation de la réponse suivant le modèle établi.

Dans ce contexte, l'objectif visé est la mise en place des modèles polynomiaux traduisant les réponses du système en fonction de la variation des facteurs.

Comme exemple du plan factoriel discuté en-dessus, la figure II.11 présente la surface de réponse de la puissance maximale en fonction des deux facteurs : l'éclairage et la température, cette figure montre la variation de la réponse sous la variation simultanée des facteurs, elle varie proportionnellement et dans la même direction de l'éclairage, mais varie légèrement et dans la direction opposée de la température.

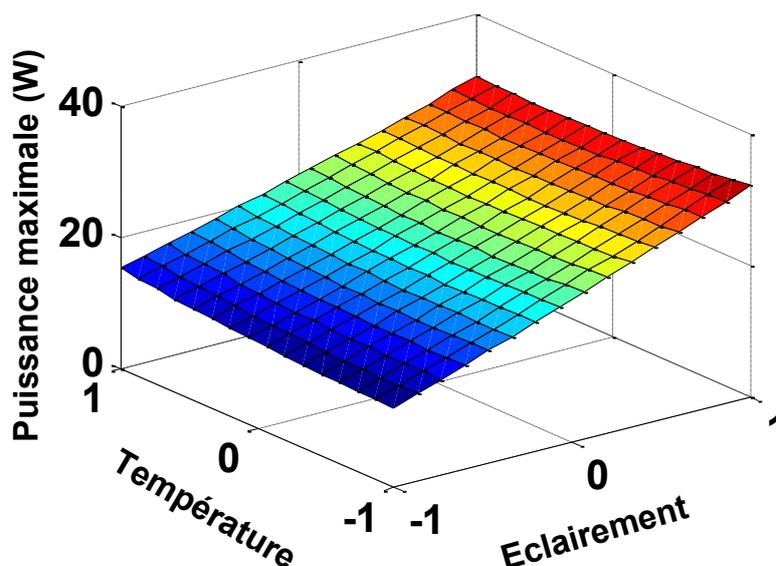


Fig. II.11. Exemple d'une surface de réponse

II.4.3.2. Courbe de contour

Les courbes de contours où les courbes iso-surfaces, comme celles présentés en figure II.12, résultent d'une projection de la surface de réponse sur un plan horizontal. Elles s'interprètent comme les courbes de niveaux. Tout comme pour les surfaces de réponses, cette représentation ne fait intervenir que deux facteurs à la fois les autres devant être fixés à un niveau constant dans le cas de la présence de plusieurs facteurs.

La figure II.12 est une projection de la surface de réponse sur un plan à deux dimensions, elle présente un tracé de courbe de contour de la réponse en fonction des facteurs. Sur cette courbe on peut tirer les valeurs de la réponse à différents niveaux de facteurs, ainsi que la direction de variation de la réponse. On prouve que la puissance maximale dépend fortement à l'éclairement, cette dépendance est traduite par une augmentation qui se fait dans le même sens que le facteur éclairément, contrairement au facteur température, qui présente une faible dépendance, d'où une diminution de la puissance maximale pour les fortes valeurs de la température.

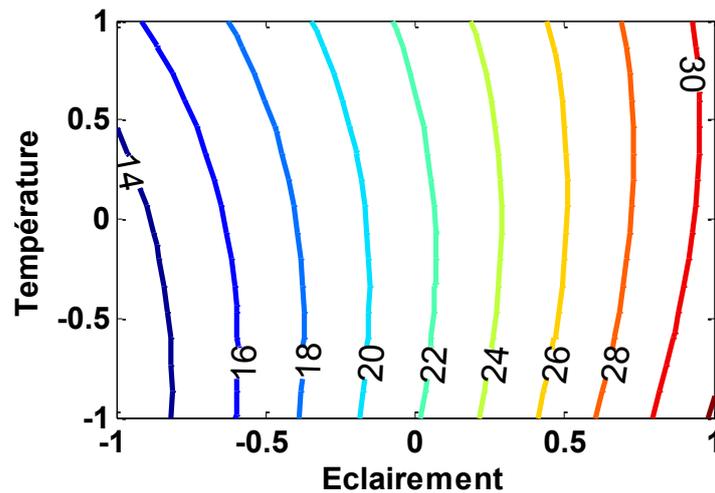


Fig. II.12. Exemple d'une courbe de contour

II.5. Conclusion

Le présent chapitre a été consacré à la description générale de la méthode des plans d'expériences. Nous y avons décrit principalement les différentes étapes de la planification expérimentale et nous avons illustré notre propos par l'étude originale d'un système particulier correspondant à notre sujet, à savoir, l'effet de la température et de l'irradiation sur la réponse électrique d'un panneau photovoltaïque. En premier temps, on formalisait le problème, là où il fallait définir l'objectif de l'étude, préciser les réponses et les différents facteurs (type de facteur, les niveaux et les interactions). Ensuite nous avons construit notre plan d'expérience avec le choix de la technique d'étude. Dans un second temps, nous avons présenté la réalisation des essais ou d'expériences déjà choisie pour l'étude déterminée. Cependant, une modélisation

mathématique a été décrite, avec l'introduction des méthodes de calculs définissant par ailleurs un modèle qui abordait la relation entre les réponses et les facteurs. La dernière étape que nous avons présentée a été subdivisée en deux parties : une première partie assurant l'analyse des résultats des essais et une deuxième permettant l'interprétation et validation des résultats obtenus.

Dans la première partie, en plus de l'analyse des résultats, cette phase est suivie par une analyse statistique réalisée en effectuant le calcul de différents paramètres nécessaires afin de mieux expliquer les résultats. Cette partie se termine par une analyse graphique qui illustre les résultats. Cette première partie constitue une plateforme pour la deuxième partie d'interprétation et validation des résultats obtenus, ce qui fait appel à des compétences dans la méthode *DoE* et dans le domaine applicatif comme ici dans le photovoltaïque solaire.

CHAPITRE III

Chapitre III

Caractérisation et modélisation de différents modules PV par la méthode DoE

III.1	Introduction	777
III.2.	Plan de criblage	80
III.3.	Plan de surface de réponse	80
III.4.	Configuration expérimentale et mesures.....	79
III.5.	Modélisation et caractérisation de la réponse d'un module PV	82
III.6.	Résultats et interprétation.....	85
III.7.	Conclusion.....	106

III.1. Introduction

Comme nous l'avons décrit en détail et illustré par un exemple dans le chapitre précédent, la méthode des plans d'expériences (Design of Experiments ou *DoE*) constitue une étape irréversible dans la carrière des spécialistes et mêmes des chercheurs, c'est un outil pratique, simple et ne nécessite qu'une bonne planification par l'expérimentateur. Elle minimise considérablement le temps de calcul et le nombre des expériences, donc, avec un nombre réduit des expériences on peut avoir un maximum de connaissances sur la réponse du système sans dégrader sa précision [Dagn12, Bend15]. Son principal avantage réside dans la possibilité d'estimer les effets des facteurs indépendants, les interactions existant et leurs capacités de modifier la réponse [Mikk17], en se basant sur des calculs algébriques, statistiques et graphiques.

Dans le présent travail de recherche, je rappelle que nous avons pour objectif original la caractérisation et la modélisation de différents modules PV par la méthode *DoE*. En effet, dans la littérature, certains auteurs ont présentés des méthodes de modélisation de modules photovoltaïques PV, mais ces méthodes nécessitent une connaissance approfondie des propriétés de la physique du PV ou sont basées sur des fiches techniques fournies par les fabricants [Isha11, Kand17, Mell18, Soro18, Bisq18]. Par ailleurs, ces méthodes sont basées sur des modèles mathématiques relativement complexes et spécifiques [Hasa16, Elib17, Yahy18, ElAc18, Zaim19]. Compte tenu des économies de temps, financières et matérielles considérables que nous pouvons espérer dans le développement de nouveaux systèmes photovoltaïques performants, la méthode *DoE* semble être adaptée pour offrir un moyen pratique en amont pour l'étude. Plusieurs travaux de recherches ont été achevés dans ce sens tels que ceux de processus de conception d'un nouveau produit ou d'analyse statistique [Mich15], ainsi que d'optimisation d'un procédé de fabrication [Saha11] et d'amélioration de ces performances [Mont07] ou de prédiction et caractérisation de son modèle comportemental [Hann13, Char14, Schu16, Kess18].

Le présent chapitre est consacré à l'application de la méthode des plans d'expériences pour modéliser et caractériser le comportement de la réponse de modules photovoltaïques PV de technologies différentes de la filière silicium. Nous avons étudié des panneaux photovoltaïques de technologie monocristalline, multi-cristalline et amorphe. Nous avons considéré dans notre étude les conditions réelles de fonctionnement des panneaux. Pour cela, nous avons étudié l'influence des conditions météorologiques, à savoir l'influence de l'irradiation solaire et de la température de surface de module PV sur leurs propriétés ou réponses fonctionnelles que sont les caractéristiques électriques et le rendement. Concernant les caractéristiques électriques des panneaux, nous nous sommes plus spécialement intéressés à la puissance maximum délivrée par le module PV (notion de Point de Puissance Maximum, MPP) et les deux autres points spécifiques de la caractéristique I-V à savoir le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Nous allons ensuite ressortir le modèle postulé des différentes réponses et comparer les résultats obtenus par simulation avec ceux obtenus de l'expérimentation. Un premier plan de criblage est utilisé pour modéliser la réponse désirée du

module PV, ensuite on élargira le nombre des expériences pour mieux utiliser la technique de surface de réponses.

Dans un premier temps, on appliquera la technique de criblage afin de modéliser les réponses désirées du système étudié, tout en spécifiant leur analyse statistique ainsi que leur analyse graphique. Ensuite, on pourra détecter l'effet le plus significatif et leur influence sur la variation de la réponse. Dans un second temps, on utilisera la technique de surface de réponse pour modéliser et caractériser le comportement de la réponse du système sous les variations des conditions d'utilisations.

Cette modélisation sera performée grâce à un programme spécifique que nous avons développé dans l'environnement MATLAB afin d'établir la matrice d'expérience du système, le calcul des coefficients du modèle ainsi que les réponses estimées par le modèle. Un calcul d'erreur permettra aussi de justifier la différence entre les réponses mesurées et celles calculées, en plus des tracés des effets et des surfaces de réponses. La validation des résultats obtenus précédemment pourra alors être réalisée via l'utilisation d'un logiciel de calcul spécialisé dans ce domaine.

III.2. Plan de criblage

Le plan de criblage plus connu sous l'appellation « plan de screening » est un plan factoriel complet noté " 2^2 "; avec exactement quatre observations, on peut avoir un plan factoriel. Comme, il est possible d'ajouter des points centraux à ce plan. Selon la distribution des points expérimentaux dans le domaine d'étude, on distingue deux modèles de plans :

III.2.1. Modèle conventionnel

Le modèle conventionnel où standard correspond à un modèle postulé généré par quatre essais expérimentaux. Ces points expérimentaux sont situés exactement aux sommets du domaine d'étude [Gou96]. Avec seulement quatre essais expérimentaux, nous obtenons un plan factoriel composé de deux facteurs ayant chacun deux niveaux.

III.2.2. Modèle non conventionnel

Le modèle non conventionnel correspond à un modèle postulé généré par quatre essais expérimentaux, mais les points expérimentaux ne se situant pas aux sommets du domaine d'étude [Goup96, Char15]. Ce n'est pas toujours possible d'atteindre les sommets selon les conditions d'expérimentations.

III.3. Plan de surface de réponse

Le plan de surface de réponse est un autre plan permettant de modéliser la variable dépendante en fonction des variables indépendantes en utilisant les termes d'ordre deux ou quadratiques. Les plans d'expériences pour l'étude de surface de réponse constituent une

deuxième étape, après un plan de criblage destiné à identifier les facteurs les plus influents. Cette méthode permet la recherche des niveaux optimaux des facteurs afin d'atteindre un niveau de réponse souhaité [Kara04]. Le plan pour surface de réponse est associé à un modèle expérimental polynomial d'ordre deux correspondant au modèle mis en œuvre généré par un minimum d'essais expérimentaux possibles. Ce nouveau design considère les termes du second ordre, il contribue à améliorer la précision du modèle prédit. Une étude de surface de réponse quant à elle permet, à travers un modèle polynomial le plus souvent, de traduire les variations d'une réponse dans un domaine expérimental [Rabi07].

III.4. Configuration expérimentale et mesures

Afin de présenter la procédure utilisée, je rappelles que dans ce chapitre, nous avons appliqué la méthode *DoE* en suivant la théorie résumée dans le précédent chapitre, et nous nous sommes intéressé à modéliser le comportement de la puissance maximale délivrée par les modules PV de la filière silicium relatif aux trois technologies multi-cristalline, monocristalline et amorphe en fonction de la variation des paramètres environnementaux réels. En premier temps, nous avons appliqué la méthode *DoE* sur le module PV multi-cristallin et en second temps, nous avons généralisé ce concept *DoE* aux autres modules en utilisant la même procédure.

La partie expérimentale a été réalisée sur le banc d'essai développé au Laboratoire Matériaux Optiques, Photonique et Systèmes, *LMOPS* de l'Université de Lorraine, et de l'école CentraleSupélec à Metz en France, grâce à une collaboration très active avec des chercheurs du Laboratoire de Génie Electrique et des Energies Renouvelable, *LGEER*, de l'Université de Chlef en Algérie.

Le banc d'essai que nous avons développé est utilisé pour mesurer les paramètres d'entrées « facteurs » ainsi que les paramètres de sorties « réponses » du système étudié. Ces paramètres sont choisis par l'expérimentateur afin d'atteindre les objectifs énoncés au début du travail. Le banc d'essai présenté en figure III.1 comprend les éléments suivants : un module PV, une charge dynamique, un oscilloscope, un voltmètre et un ampèremètre. En plus, une source d'irradiation artificielle, un pyranomètre et un thermomètre infrarouge.

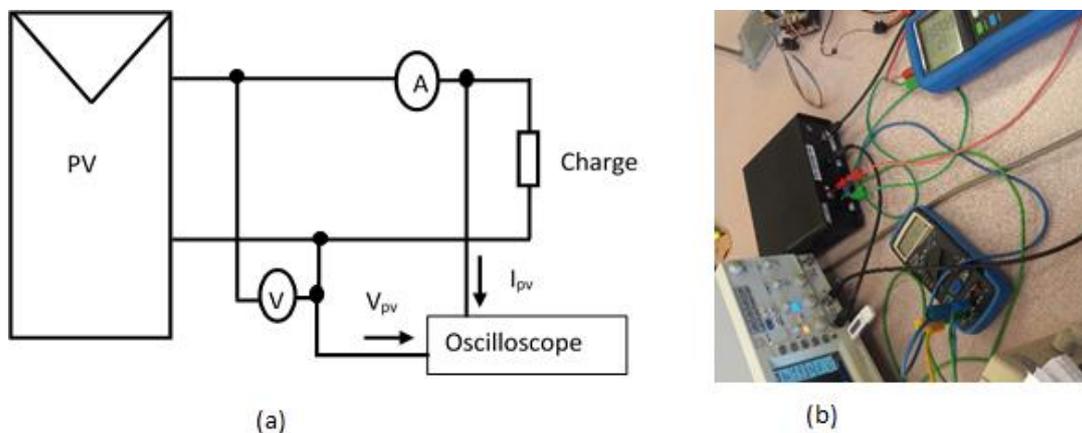


Fig. III.1. Banc d'essai (a) schéma de principe, (b) banc expérimental

Le tableau 3.1 résume les fiches techniques des trois modules photovoltaïques disponibles au LMOPS et objet des caractérisations expérimentales que nous avons faites dans ce travail de recherche.

Table 3.1. Caractéristiques électriques de la fiche technique des modules PV dans des conditions de tests standards ($1000W/m^2$, AM1.5 et 25 °C) (plaque signalétique et datasheets).

Technologie	Référence	P_m (W)	V_{pm} (V)	I_{pm} (A)	V_{co} (V)	I_{cc} (A)	N_s	N_p
Multi-cristalline	BP350J	50	17.5	2.9	21.8	3.2	36	2
Monocristalline	PS040PR	40	17	2.34	21	2.56	38	2
Amorphe	FEE 14-12	14	16	0.87	22	1.05	/	/

Le module monocristallin en question est construit sur une base de 76 cellules (4 rangées de 19 cellules). Le module multi-cristallin est composé de 72 cellules (2 rangées de 36 cellules). Dans chacun des deux, chaque rangée est contournée par une diode de dérivation (by-pass) destinée à la protection contre les courants forts liés à la création de stress et points chauds dans une des cellules PV qui la composent.

La source d'irradiation artificielle, présentée en figure III.2, est une source de marque Deltalab de 6 kW, composée de 6 ampoules quartz-halogène qui seront placées à différentes distances du module PV permettant de faire varier le niveau d'irradiation. Hannane et *al* ont considéré comme facteurs les valeurs de la distance qui sépare la source d'ensoleillement du module PV [Hann13]. Ce choix est judicieux pour effectuer des expérimentations simples de laboratoire mais ne conduit pas à l'utilisation d'une variable pertinente dans le cas d'un fonctionnement en conditions réelles pour la caractérisation des modules PV. C'est pour cette raison que, dans le travail actuel, nous avons considéré comme facteurs pertinents, les vraies valeurs d'irradiation assurées par la source artificielle, mesurées par un pyranomètre et données en mV sous forme de tension image d'irradiation. La température de surface du module PV est mesurée, quant à elle, par un thermomètre IR. Un système de refroidissement à ventilation contrôlée est mis en place en permanence pour maintenir la température stable pendant toutes les expériences.



Fig. III.2. Source d'irradiation artificielle DELTALB 6 kW

Les paramètres facteurs d'entrées concernés sont collectés expérimentalement par les appareils schématisés par la figure III.3 ci-dessous. La caractérisation de panneaux solaires aura comme facteurs :

- l'irradiation solaire I_r (W/m^2) à l'aide d'un pyranomètre placé au centre du panneau PV,
- la température de surface T ($^{\circ}C$) au centre du panneau PV à l'aide d'un thermomètre infrarouge,
- la tension à circuit ouvert V_{co} et le courant de court-circuit I_{cc} du panneau qui rentrent dans le calcul de la puissance maximale.

Le calcul de cette puissance maximale est basée sur une fraction de la tension en circuit ouvert est estimée à 70% du facteur de forme, soit à 70% du produit $V_{co} \times I_{cc}$ [Huss04, Zega11a, Kach11]. La valeur d'irradiation mesurée est donnée en (mV) et peut être convertie en W/m^2 en fonction de la sensibilité du pyranomètre commercial CMP10 utilisé. La formule de conversion est donné dans la fiche technique de l'appareil par $S = 10,33 \mu V / W/m^2$.

Un thermomètre infrarouge IR fournit les températures de la surface du module, enregistrées avec une précision de 1%. Les relevés de température sont effectués pour un niveau d'éclairage donné à des intervalles réguliers définis par l'expérimentateur. Les photos de la figure III.3 représentent le pyranomètre et le thermomètre utilisés pour les mesures de l'irradiation solaire et la température de surface.



Fig. III.3. A droite le pyranomètre, à gauche le thermomètre IR

Le tableau 3.2 exprime les mesures effectuées des paramètres d'entrées ainsi que les paramètres de sorties désignés par l'expérimentateur pour les trois modules photovoltaïques.

Ces mesures expérimentales doivent être exploitées selon le plan d'étude choisi et le besoin de la technique utilisée, afin d'atteindre l'objectif tracé. Selon les points expérimentaux choisis pour construire le plan d'expérience, on obtient un modèle mathématique prédictif de la réponse désirée, ce modèle diffère d'un plan à un autre.

Table 3.2. Les observations expérimentales et les réponses désirées pour les trois modules PV

Multi-cristallin						Monocristallin					Amorphe				
Facteurs			Réponses			Facteurs			Réponses		Facteurs			Réponses	
N°	I_r (mV)	T (°C)	V_{co} (V)	I_{cc} (A)	P_m (W)	I_r (mV)	T (°C)	V_{co} (V)	I_{cc} (A)	P_m (W)	I_r (mV)	T (°C)	V_{co} (V)	I_{cc} (A)	P_m (W)
01	5,8	28,8	19,7	0,918	12,66	5,9	28,9	20,1	0,706	9,93	5,7	34,8	18,3	0,138	1,77
02	5,8	30,1	19,6	0,918	12,59	5,9	32,6	19,9	0,712	9,92	5,7	36,9	18,1	0,138	1,75
03	5,8	33,7	19,5	0,92	12,56	5,9	34,7	19,7	0,716	9,87	5,7	38,8	18	0,139	1,75
04	5,8	40,6	19,1	0,928	12,41	5,9	37,4	19,6	0,719	9,86	8,6	36,7	18,7	0,19	2,49
05	8,7	31,8	20,1	1,193	16,79	8,5	30,5	20,5	0,894	12,83	8,6	38,7	18,6	0,19	2,47
06	8,7	35,7	19,7	1,204	16,60	8,5	34,6	20,1	0,918	12,92	8,6	40	18,5	0,192	2,49
07	8,7	38,8	19,6	1,206	16,55	8,5	37	19,9	0,915	12,75	8,6	41,3	18,4	0,191	2,46
08	8,7	43,7	19,2	1,209	16,25	8,5	42,3	19,6	0,899	12,33	8,6	42,3	18,3	0,192	2,46
09	13,9	32,6	20,5	1,69	24,25	13,6	34,2	20,5	1,263	18,12	13,6	36,6	19,3	0,292	3,94
10	13,9	35,4	20,1	1,699	23,90	13,6	37,1	20,3	1,269	18,03	13,6	40,6	18,9	0,295	3,90
11	13,9	38,1	19,9	1,704	23,74	13,6	41,1	19,8	1,282	17,77	13,6	43,7	18,8	0,299	3,93
12	13,9	43,5	19,5	1,719	23,46	13,6	43,9	19,4	1,281	17,40	13,6	48,7	18,8	0,299	3,93
13	19,1	32,6	20,7	2,175	31,52	18,4	36,3	20,5	1,633	23,43	18,5	36,8	19,7	0,378	5,21
14	19,1	41,3	20	2,214	31,00	18,4	38,1	20,3	1,638	23,28	18,5	39,8	19,4	0,384	5,21
15	19,1	47,4	19,5	2,219	30,29	18,4	45,1	19,8	1,653	22,91	18,5	43,2	19	0,385	5,12

III.5. Modélisation et caractérisation de la réponse d'un module PV

Dans ce qui suit, nous abordons à la modélisation et à la caractérisation du comportement de la réponse désirée de module PV de technologies différentes par la méthode *DoE* sous l'influence simultanée de l'irradiation solaire et de la température de la surface.

Je rappelle que pour mieux illustrer la mise en œuvre pratique de la méthode *DoE*, nous avons choisi de présenter le développement détaillé de la réponse : puissance maximale P_m , comme sortie du panneau PV multi-cristallin (Pour ce panneau, P_m sera noté P_{m_Multi}). La même procédure sera ensuite généralisée pour y extraire l'équation du modèle prédictif pour les autres sorties manquantes, à savoir le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Tout cela concernera dans une troisième partie les deux autres technologies de panneaux photovoltaïques : le monocristallin et l'amorphe.

La première étape de l'application de la méthode *DoE* est le codage des facteurs, afin de passer des coordonnées en unités originales aux coordonnées centrées réduites (CCR) où sans unités. On précise par ailleurs les niveaux supérieurs et inférieurs des deux facteurs de l'étude : de l'irradiation solaire et de la température de surface délimitant le domaine expérimental comme mentionnés dans le tableau 3.3 ci-après.

Table 3.3. Niveaux des facteurs et leurs coordonnées centrées réduites (CCR)

Irradiation solaire I_r (mV)	8,7	13,9	19,1
Coordonnées Centrées réduites (CCR)	-1	0	+1
Température de surface T (°C)	31,8	39,6	47,4

Les coordonnées centrées réduites des variables d'entrées x_1, x_2 représentant l'irradiation solaire (I_r) et la température de surface (T), respectivement sont calculées comme suit :

$$x_1 = \frac{8,7-13,9}{5,2} = -1$$

$$x_2 = \frac{47,4-39,6}{7,8} = +1$$

et de la même façon, le Pas est calculé par

$$\text{Pour le facteur d'irradiation } x_1 : Pas 1 = (19,1 - 8,7)/2 = 5,2$$

$$\text{Pour le facteur de température } x_2 : Pas 2 = (47,4 - 31,8)/2 = 7,8$$

De la même manière, on calcule toutes les coordonnées centrées réduites des autres valeurs des facteurs considérés, afin d'unifier les unités des variables.

III.5.1. Modèle de régression simple

Le modèle de régression simple est un modèle prédictif d'un plan factoriel complet composé de deux facteurs à deux niveaux chacun, donc avec quatre essais expérimentaux on peut avoir plan factoriel noté 2^2 (4 expériences). Ce modèle est défini par les effets des deux facteurs et leurs interaction. Les expériences réalisées de ce modèle ainsi que les réponses choisies correspondantes sont mentionnés dans le tableau 3.4. Ensuite, il est maintenant possible d'obtenir le système de coordonnées centrées réduites (CCR) des deux facteurs I_r et T comme indiqué dans le tableau 3.4.

Table 3.4. Données expérimentales du modèle de régression simple

I_r (mV)	T (°C)	I_r (CCR)	T (CCR)	P_m (W)	I_{cc} (A)	V_{co} (V)
8.7	31.8	-1	-1	16.79	1,193	20,1
8.7	43.7	-1	0,5256	16.25	1,209	19,2
19.1	32.6	1	-0,8974	31.52	2,175	20,7
19.1	47.4	1	1	30.29	2,219	19,5

La technique de criblage permet de déterminer parmi les facteurs énoncés par l'expérimentateur au début de l'étude, ce qui a un effet statistiquement significatif sur la réponse du système. Le modèle de la régression qui relie la réponse aux facteurs est donnée par :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 \quad (\text{III.1})$$

Avec x_1 et x_2 , les facteurs irradiation solaire et la température de surface respectivement, a_0 est le coefficient représentant la valeur centrale, a_1 , a_2 et a_{12} sont les coefficients associés aux effets des facteurs x_1 , x_2 et l'effet de l'interaction entre eux respectivement.

En remplaçant dans l'équation III.1 la réponse y , qui est la puissance maximale P_m , et les facteurs x_1 et x_2 par leurs valeurs centrées réduites comme indiqué dans le tableau 3.4, on obtient le système linéaire suivant :

$$\begin{cases} a_0 - a_1 - a_2 + a_{12} = 16.79 \\ a_0 - a_1 + 0,5256a_2 - 0,5256a_{12} = 16.25 \\ a_0 + a_1 - 0,8974a_2 - a_{12} = 31.52 \\ a_0 + a_1 + a_2 + a_{12} = 30.29 \end{cases} \quad (III.2)$$

Sous une forme matricielle, l'équation III.2 peut s'écrire :

$$\begin{bmatrix} 1.0000 & -1.0000 & -1.0000 & 1.0000 \\ 1.0000 & -1.0000 & 0.5256 & -0.5256 \\ 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & -0.8974 \\ 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 16.79 \\ 16.25 \\ 31.52 \\ 30.29 \end{bmatrix} \quad (III.3)$$

La résolution de ce système d'équation est faite par un propre programme de calcul sous l'environnement MATLAB, aboutissant aux coefficients du modèle.

III.5.2. Modèle de régression multiple

Le modèle de régression multiple est un modèle basant sur un plan constitué par deux facteurs possédant chacun deux niveaux, mais en ajoutant des essais expérimentaux pour le même plan expérimental. Ce modèle est décrit par les effets des deux facteurs, leurs interactions et les termes des effets des facteurs du second ordre ainsi que les résidus. Afin de valider le modèle mis en œuvre, nous avons utilisés 10 essais pour un plan d'étude délimité par les quatre points expérimentaux initiaux mentionnés ci-dessus (01, 10, 04, 12). L'équation représentative de ce modèle deviendra alors :

$$y = a_0 + a_1x_1 + a_2x_2 + a_{12}x_1x_2 + a_{11}x_1^2 + a_{22}x_2^2 + e \quad (III.4)$$

A partir du tableau 3.2, en remplaçant l'irradiation solaire x_1 et la température de surface x_2 par leurs valeurs en CCR dans l'équation III.4, on obtient le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} a_0 - a_1 - a_2 + a_{12} + a_{11} + a_{22} + e_1 = 12.66 \\ a_0 - a_1 - 0.3423a_2 + 0.3423a_{12} + a_{11} + 0.1172a_{22} + e_2 = 12.56 \\ \dots \\ \dots \\ a_0 + a_1 + 0.9732a_2 + 0.9732a_{12} + a_{11} + 0.9470a_{22} + e_{15} = 23.46 \end{cases} \quad (III.5)$$

La matrice d'expérience correspondante est donnée par :

$$\begin{bmatrix} 1.0000 & -1.0000 & -1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 \\ 1.0000 & -1.0000 & -0.3423 & 0.3423 & 1.0000 & 0.1172 \\ 1.0000 & -1.0000 & 0.9732 & -0.9732 & 1.0000 & 0.9470 \\ 1.0000 & 0.0000 & -0.5973 & 0.0000 & 0.0000 & 0.3568 \\ 1.0000 & 0.0000 & -0.0470 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0022 \\ 1.0000 & 0.0000 & 0.3423 & 0.0000 & 0.0000 & 0.1172 \\ 1.0000 & 0.0000 & 1.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 1.0000 \\ 1.0000 & 1.0000 & -0.4899 & -0.4899 & 1.0000 & 0.2400 \\ 1.0000 & 1.0000 & 0.3020 & 0.3020 & 1.0000 & 0.0912 \\ 1.0000 & 1.0000 & 0.9732 & 0.9732 & 1.0000 & 0.9470 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_{12} \\ a_{11} \\ a_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_4 \\ e_5 \\ e_6 \\ e_7 \\ e_8 \\ e_9 \\ e_{10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 12.66 \\ 12.56 \\ 12.41 \\ 16.79 \\ 16.60 \\ 16.55 \\ 16.25 \\ 24.25 \\ 23.74 \\ 23.46 \end{bmatrix} \quad (\text{III.6})$$

Dans ce système basé sur les 10 essais, le nombre de coefficients inconnus à calculer est déterminés par $p = \binom{1}{2}(k + 2)(k + 1)$, où k est le nombre de facteurs plus le nombre de résidus inconnus également égal au nombre d'essais. Avec $k = 2$, $p = 6$ et 10 résidus distincts, le système de l'équation 6 à résoudre a $10 + 6 = 16$ inconnues. Par ailleurs, en raison du nombre d'équations dans le système inférieur au nombre d'inconnues, et comme mentionné ci-dessus dans la partie théorique, nous avons développé pour sa résolution un autre programme dans l'environnement MATLAB permettant d'obtenir les éléments de la matrice d'expérience en utilisant la méthode des moindres carrés. Cette méthode permet ainsi le calcul des coefficients du modèle prédictif. Ces derniers peuvent être remplacés dans l'équation III.4 pour avoir le modèle de régression servant au calcul des réponses estimées afin d'être comparées aux réponses mesurées.

III.6. Résultats et interprétation

Dans un premier temps, le plan de criblage est utilisé pour déterminer les effets principaux des facteurs ainsi que l'effet d'interaction entre eux sur la réponse. Cependant, on peut préciser l'effet le plus significatif capable de modifier la réponse. Il y a deux façons de discuter et d'interpréter les résultats obtenus par simulation soit par une analyse statistique, ou soit par une analyse graphique.

III.6.1. Analyse statistique de la technique de criblage

L'analyse statistique du modèle mathématique de la régression est donnée sous forme d'une analyse de variance. Cette analyse est subdivisée en trois tableaux récapitulatifs présentant les résultats de calculs. Le tableau 3.5 présente les effets des facteurs ainsi que leurs contributions dans le modèle de régression. Le tableau 3.6 donne la table d'ANOVA du modèle d'ajustement prédictif et le tableau 3.7 détermine les estimations des paramètres du modèle de régression. Dans le but de mesurer la précision du modèle prédictif de régression de la réponse, on a considéré les trois paramètres de validation : le coefficient de corrélation multiple ajusté ou de détermination R^2_{adj} , l'erreur relative E_r et l'erreur quadratique moyenne $RMSE$ (Root Mean Square Error). Dans ce qui suit, en utilisant les notations suivantes :

- A pour facteur irradiation solaire,
- B pour facteur température de la surface,

- AB pour l'interaction entre les facteurs A et B,
- AA pour facteur irradiation solaire au carré,
- BB pour facteur température de surface au carré.

Table 3.5. Test des effets des paramètres de la puissance maximale

Source	Degré de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F Ratio	Contribution (%)
A : Ir	1	206,92823	206,92823	342030,1	99,565
B : T	1	0,78322	0,78322	1294,587	0,376
AB : Ir*T	1	0,11902	0,11902	196,7355	0,057

Le tableau 3.5 montre la contribution des effets de chaque facteur dans le modèle de régression, où le facteur A est le facteur le plus significatif qui participe avec 99,56% dans le processus global comparativement au facteur B qui ne contribue qu'avec 0,37% et au facteur AB avec seulement une contribution de 0,05% considérée comme insignifiante.

La table d'ANOVA mentionnée par le tableau 3.6, donne des informations sur le processus global et spécialement sur le modèle de régression prédictif. On remarque que la somme des carrés des erreurs est beaucoup plus petite comparée à la somme des carrés du modèle. Ceci signifie que le modèle de régression est juste comme il s'ajuste avec une grande précision aux données expérimentales. Cependant et comme édicté par la théorie, toute variable présentant une probabilité inférieure à une valeur de $\alpha = 0,05$ est une variable significative et acceptée. On remarque que la probabilité du modèle prédictif de la puissance maximale est de 0,0022, qui est nettement inférieure à la valeur critique normative de α . Cette probabilité mesure la qualité du modèle de régression. Ainsi, dans notre cas la qualité de notre modèle est montrée très grande permettant un bon ajustement de la réponse.

Table 3.6. Table d'ANOVA du modèle de la puissance maximale

Source	Degré de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F Ratio	Probabilité
Modèle	3	207,83048	69,2768	114507,1	0,0022*
Erreur	1	0,00060	0,000605		
Total	4	0,11902			

On introduit alors un nouvel élément, le T_Student qui est un paramètre important utilisé pour vérifier la significativité de chacun des coefficients du modèle de régression. En conséquence, on obtient les estimations des coefficients du modèle prédictif de régression qui diffèrent d'un facteur à un autre possédant chacun un T_Student servant à tester statistiquement la négligence ou non d'un coefficient. Le fait de négliger un paramètre non significatif permet d'avoir un modèle effectif et précis.

Un test graphique est aussi présent sous forme d'une étoile (*) signifiant que le paramètre qui vaut une probabilité $\leq 0,05$, est accepté et considéré comme paramètre pertinent qui sera introduit dans le modèle de régression prédictif.

Table 3.7. Estimation des paramètres du modèle de la régression prédictif de la puissance maximale

Terme	Coefficients	Erreur Standard	T_Student	Probabilité
Intercepte	23,718	0,011	2156,2	0,0003*
A : Ir	7,1925	0,012298	584,83	0,0011*
B : T	-0,4425	0,012298	-35,98	0,0177*
AB : Ir*T	-0,1725	0,012298	-14,03	0,0453*

La reconstitution des paramètres pertinents dans le modèle de l'équation III.1 ci-dessus, donne lieu au modèle prédictif de la puissance maximale comme suit :

$$P_m = 23,718 + 7,1925x_1 - 0,4425x_2 - 0,1725x_1x_2 \quad (\text{III.7})$$

A partir de l'équation III.7 et au vu des signes des coefficients propres aux facteurs, on observe la présence d'une relation positive entre la puissance maximale et l'irradiation solaire contrairement à la température de surface qui présente une relation négative. Aussi, il est clair que le coefficient d'irradiation solaire possède une valeur supérieure aux autres coefficients, ce qui signifie la grande influence et significative de l'irradiation solaire sur la variation de la puissance maximale. Ce fait est bien sur intuitivement acquis.

Le coefficient de détermination (R^2) du modèle de régression régi par l'équation III.7 vaut 0,999988, qui veut dire que la puissance maximale est exactement bien exprimée et représenté par le modèle postulé de régression. Cependant, l'erreur quadratique moyenne *RMSE* vaut 0,024597. On conclue que le modèle ajuste bien la puissance maximale, donc ce modèle est accepté.

De la même façon on généralise la méthode *DoE* sur les autres réponses et construit les modèles prédictifs postulés relatifs à la tension à circuit ouvert et le courant de court-circuit respectivement. Il est à noter que la contribution des facteurs au modèle de régression diffère d'une réponse à une autre et d'un facteur à un autre.

Pour la première réponse, la tension à circuit ouvert, comme indiqué par les calculs présentés dans le tableau 3.8, Dans le modèle prédictif, la contribution la plus grande est de 74,22 % est affecté au facteur B qui est le plus influent sur la réponse contre le facteur A avec une contribution de 20,36% et le facteur AB avec seulement une contribution de 5,4%.

Table 3.8. Test des effets des paramètres de la tension à circuit ouvert

Source	Degré de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F Ratio	Contribution (%)
A : Ir	1	0,4356	0,4356	111,1224	20,366
B : T	1	1,5876	1,5876	405,0000	74,228
AB : Ir*T	1	0,1156	0,1156	29,4898	5,404

De la table d'ANOVA donnée par le tableau 3.9, on observe que la probabilité du modèle prédit est de l'ordre de 0,0544 qui est légèrement supérieure à la valeur critique $\alpha = 0,05$ ce qui signifie que le modèle de régression de la tension à circuit ouvert est moins bon.

Table 3.9. Table d'ANOVA du modèle de la tension à circuit ouvert

Source	Degré de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F Ratio	Probabilité
Modèle	3	2,1388	0,712933	181,8707	0,0544
Erreur	1	0,00392	0,00392		
Total	4	2,14272			

Les coefficients estimés de la tension à circuit ouvert sont résumés dans le tableau 3.10. On remarque que leurs probabilités diffèrent d'un facteur à un autre, et celui qui porte un astérisque (*) présente un effet significatif sur la réponse. Sur cette base, on déduit le modèle effectif de la réponse en éliminant les coefficients les moins significatifs.

Table 3.10. Estimation des paramètres du modèle de la régression de la tension à circuit ouvert

Terme	Coefficients	Erreur Standard	T_Student	Probabilité
Intercepte	19,956	0,028	712,71	0,0009*
A : Ir	0,33	0,031305	13,42	0,0474*
B : T	-0,63	0,031305	-20,12	0,0316*
AB : Ir*T	-0,17	0,031305	-5,43	0,1159

De par les coefficients signalés dans le tableau 3.10 tenant compte de leurs significances, le modèle de la régression simple de la tension à circuit ouvert est simplifié par la négligence de l'effet combiné des deux facteurs, ce qui permet d'obtenir la relation simplifiée :

$$V_{co} = 19,956 - 0,63x_2 + 0,33x_1 \quad (\text{III.8})$$

L'application de la DoE pour la troisième réponse comme développée ci-après, a montré que les valeurs des contributions de chaque facteur au modèle de régression des deux réponses courant de court-circuit et puissance maximale sont proches. Cela nous conduit à déduire que le comportement du courant de court-circuit est similaire à celui de la puissance maximale délivrée par un module PV. Du tableau 3.11, on peut observer clairement que la contribution la plus importante est celle du facteur A avec 99,60%, contre 0,27% et 0,12% des facteurs B et AB respectivement.

On en déduit que le facteur A est le plus significatif et présente un effet non négligeable sur la réponse, c'est dire l'influence significative de l'irradiation solaire sur le courant de court-circuit du GPV considéré.

Le coefficient de corrélation multiple ajusté (R^2) du modèle de régression de l'équation III.8 est évalué à 0.992682 exprimant ainsi un bon ajustement par le modèle de régression. En

effet, l'erreur quadratique moyenne *RMSE* vaut 0,06261, d'où le modèle prédictif du courant de court-circuit donne un bon ajustement.

Table 3.11. Test des effets des paramètres du courant de court-circuit

Source	Degré de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F Ratio	Contribution (%)
A : Ir	1	0,950625	0,950625	5281,250	99,606
B : T	1	0,002601	0,002601	14,4500	0,272
AB : Ir*T	1	0,001156	0,001156	6,4222	0,121

Le tableau 3.12 ci-après donne les informations ANOVA sur le modèle prédictif du courant de court-circuit. Le plus intéressant dans ce tableau est d'avoir la probabilité pour juger est ce que le modèle est bon ou non ! Effectivement, le modèle de régression présente une probabilité de 0,0175 qui est nettement inférieure de la valeur critique définie par $\alpha = 0,05$, ce qui signifie que le modèle est acceptable.

Table 3.12. Table d'ANOVA du modèle du courant de court-circuit

Source	Degré de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F Ratio	Probabilité
Modèle	3	0,954382	0,318127	1767,374	0,0175*
Erreur	1	0,00018	0,00018		
Total	4	0,954562			

Comme déjà signalé, le T_Student et la probabilité P-value sont des indicateurs permettant de décider de la négligence ou non d'un facteur, selon qu'il est inférieur ou supérieur de la valeur de la probabilité critique qui est de l'ordre de 5%.

Il existe une relation de proportionnalité inverse entre le T_Student et la probabilité, toute grande valeur de T_Student implique une petite valeur de la probabilité, définissant par ailleurs un effet accepté et vice-versa. Donc, le modèle du courant de court-circuit est fortement lié au facteur A et presque présente une variation non significative voir négligée en fonction des deux autres facteurs B et AB.

Table 3.13. Estimation des paramètres du modèle de la régression du courant de court-circuit

Terme	Coefficients	Erreur Standard	T_Student	Probabilité
Intercepte	1,692	0,006	282,00	0,0023*
A : Ir	0,4875	0,006708	72,67	0,0088*
B : T	0,0255	0,006708	3,80	0,1638
AB : Ir*T	0,017	0,006708	2,53	0,2393

Après cette analyse et au vu des facteurs les plus influençant, on en déduit le modèle de régression du courant de court-circuit, qui est simplifié au modèle suivant :

$$I_{cc} = 1,692 + 0,4875x_1 \quad (\text{III.9})$$

Le coefficient de corrélation multiple ajusté (R^2) du modèle de régression de l'équation III.9 vaut 0,998494, cela exprime un bon ajustement par le modèle de régression. En effet, l'erreur quadratique moyenne *RMSE* vaut 0,022361 confirme que le modèle prédit du courant de court-circuit donne un bon ajustement.

Dans cette partie de l'étude, il est important de déduire que l'analyse statistique nous a conduit à ressortir les modèles prédictifs des trois réponses désirées du module PV multi-cristallin, ainsi que leur influence sur la variation de la réponse. Par contre, il est souhaitable de confirmer cette analyse statistique par une analyse graphique permettant une meilleure appréhension du comportement voir un apport pour une aide à la décision dans la modélisation, voire dans l'intégration ou pas d'un tel panneau PV.

III.6.2. Analyse graphique de la technique de criblage

L'analyse graphique permet de définir la signification ainsi que la direction de variation de la réponse sous la variation simultanée des facteurs, comme elle permet de confirmer les résultats obtenus par l'analyse statistique. L'analyse graphique doit être sous forme des pentes de lignes de régression présentant les effets des facteurs et leurs interactions ou sous forme de surface de réponse ou même des courbes de contours correspondants.

Quand les facteurs sont en coordonnées centrées réduites, les effets moyens sont représentés par des pentes correspondantes aux segments de lignes de régression. Chaque effet moyen montre la valeur moyenne de la variable dépendante (réponse) en fonction d'une variable indépendante (facteur) [Bart99].

Le tracé des effets moyens ou principaux ont été utilisés pour l'analyse statistique des données, en particulier pour les plans factoriels [Mont97, Bart99]. Donc, l'effet global d'un facteur est la différence entre la moyenne des réponses au niveau haut du facteur et la moyenne des réponses au niveau bas. Cependant, l'effet moyen ou l'effet d'un facteur est la moitié de l'effet global.

La figure III.4 montre que lorsque l'irradiation solaire passe de 1346 W/m^2 ou niveau 0 à 1849 W/m^2 ou niveau +1, la puissance maximale passe alors de $23,7 \text{ W}$ à $30,9 \text{ W}$ avec une augmentation de $7,2 \text{ W}$ qui représente l'effet du facteur A. En plus, quand la température de surface passe de $39,6 \text{ }^\circ\text{C}$ ou niveau 0 à $47,4 \text{ }^\circ\text{C}$ ou niveau +1, la puissance maximale passe de $23,7 \text{ W}$ à $23,18 \text{ W}$, donc une diminution de $0,44 \text{ W}$ qui représente ainsi l'effet du facteur B. Donc, l'effet global du facteur A correspond au passage de la puissance de $16,5 \text{ W}$ à $30,9 \text{ W}$ ainsi que l'effet global du facteur B correspond au passage de la puissance de $24,22 \text{ W}$ à $23,18 \text{ W}$. Le comportement de la puissance maximale est la première validation phénoménologique qualitative de la méthode *DoE* et du modèle associé pour les modules PV.

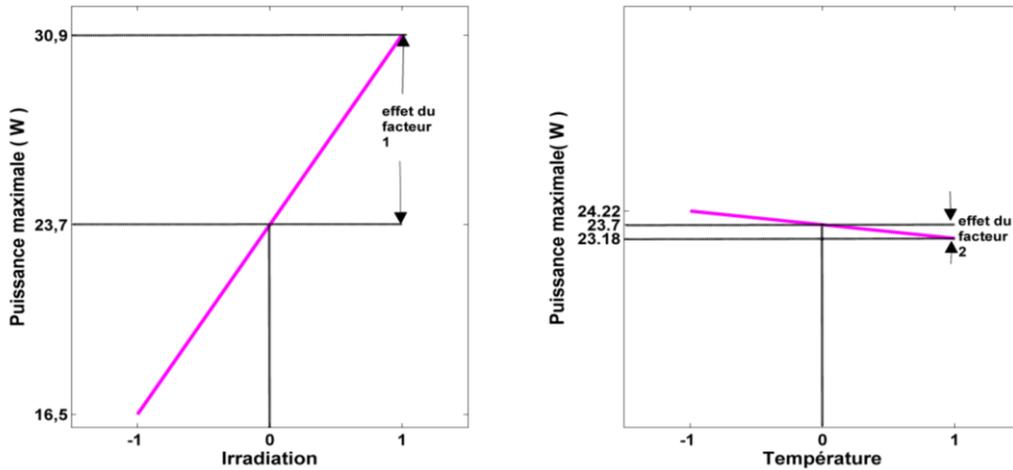


Fig. III.4. Illustration des effets des facteurs sur la puissance maximale

En effet, grâce à la théorie des plans d'expériences on peut analyser l'effet d'interaction entre l'irradiation solaire et la température de surface sur la variation de la réponse puissance maximale. Le tracé de l'effet d'interaction est un ensemble de tracés des effets moyens, chacun correspond à une valeur différente de la seconde variable. Si les lignes ne sont pas parallèles ou que les courbes de contours ne sont pas équidistantes sur toute la plage de la variable indépendante, alors il y a interaction entre les deux variables indépendantes [Bart99]. La figure III.5 présente l'effet d'interaction entre facteurs A et B ou autrement dit la variation simultanée des facteurs et leurs influence sur la variation de la puissance.

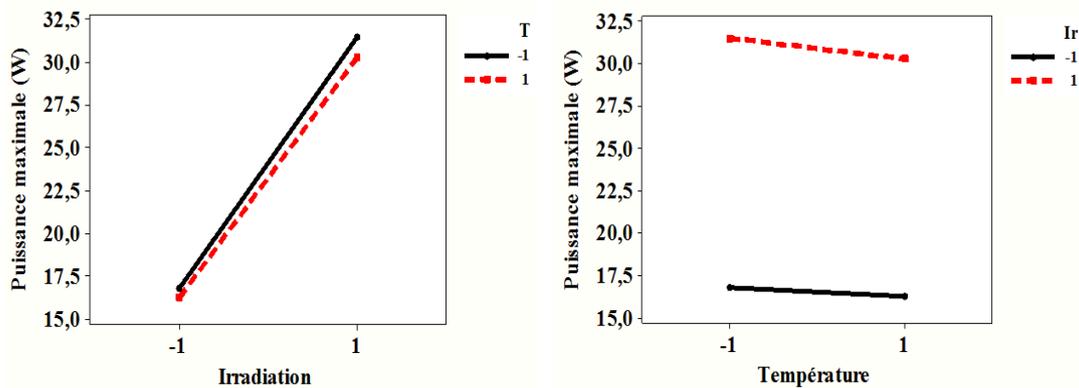


Fig. III.5. Illustration de l'effet d'interaction des facteurs sur la puissance maximale

A gauche de la figure III.5, on observe l'effet interactif de la température de surface sur l'irradiation solaire ou simplement interaction température/irradiation. C'est la moitié de la différence entre l'effet de l'irradiation quand la température est au niveau bas (pente noire) et l'effet de l'irradiation lorsque la température est au niveau haut (pente rouge pointillée), elle est égale à $-0,1725$. Cela signifie que, l'effet de la température est moins important quand l'irradiation est agrandie. Quand la température est de $31,8^{\circ}\text{C}$ (niveau -1), l'effet de l'irradiation est de $7,365\text{ W}$. Quand la température est de $47,4^{\circ}\text{C}$ (niveau +1), l'effet de l'irradiation sur la puissance maximale est de $7,02\text{ W}$. A la droite de la même figure III.5 se présente l'interaction irradiation/température, cela aussi signifie que l'effet de l'irradiation est un peu plus élevé

quand la température diminue. Quand l'irradiation est de 842 W/m^2 , l'effet de la température est de $0,27 \text{ W}$. Quand l'irradiation est de 1849 W/m^2 , l'effet de la température sur la puissance est de $0,62 \text{ W}$.

En effet, la figure III.6 présente la surface de réponse de la réponse puissance maximale délivrée par le module PV en question et la courbe de contour correspondante servant à confirmer la direction de variation de cette réponse sous les effets des facteurs considérés. On constate que la variation de la puissance maximale agit dans la même direction de variation de l'effet de l'irradiation solaire et dans la direction opposée de la variation de l'effet de la température de surface du module PV. L'irradiation solaire a un effet significatif sur la variation de la puissance maximale comparativement avec l'effet de la température de surface.

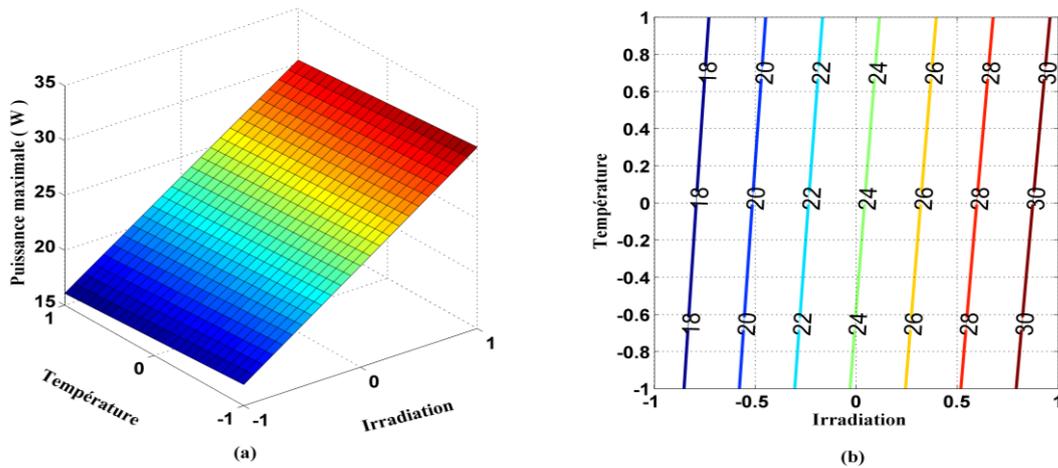


Fig. III.6. Surface de réponse et courbe de contour de la puissance maximale

L'effet du facteur de température agit sur la direction opposée à celle de l'irradiation conduisant à une pente négative montrant que la variation de la tension à circuit ouvert augmente considérablement avec l'irradiation mais diminue fortement avec la température.

La figure III.7 illustre cette variation comportementale de la réponse ainsi que les effets du facteur irradiation solaire et facteur température de surface de module PV multi-cristallin.

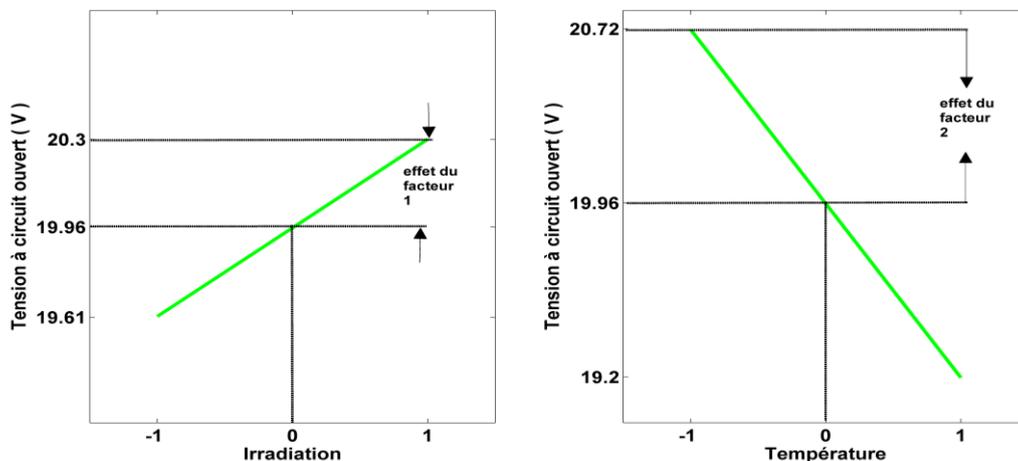


Fig. III.7. Illustration des effets des facteurs sur la tension à circuit ouvert

La tension à circuit ouvert présente un comportement différent à ceux des deux autres réponses, on remarque l'existence d'une grande différence entre les pentes des effets des facteurs, d'où la présence d'une forte interaction entre eux.

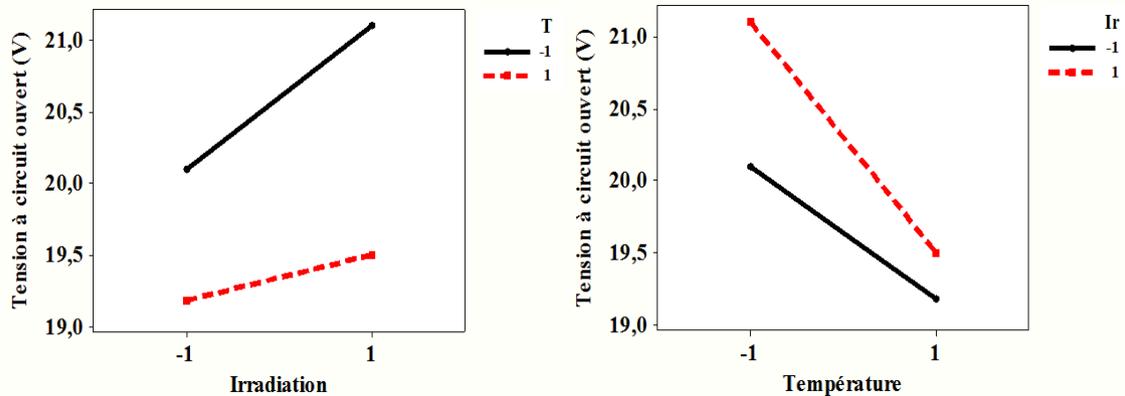


Fig. III.8. Illustration de l'effet d'interaction sur la tension à circuit ouvert.

L'interprétation précédente du comportement de la réponse tension à circuit ouvert est une véritable information sur la réponse. Il est clair dans la figure III.9 que la température joue un rôle prépondérant sur la variation de la tension à circuit ouvert. Elle influence significativement sur la réponse considérée car la tension à circuit ouvert diminue quand la température augmente mais elle contredit la direction de variation de l'irradiation.

On remarque que les trois réponses varient dans la même direction de variation de l'irradiation solaire, mais différemment avec la direction de la variation de la température de surface.

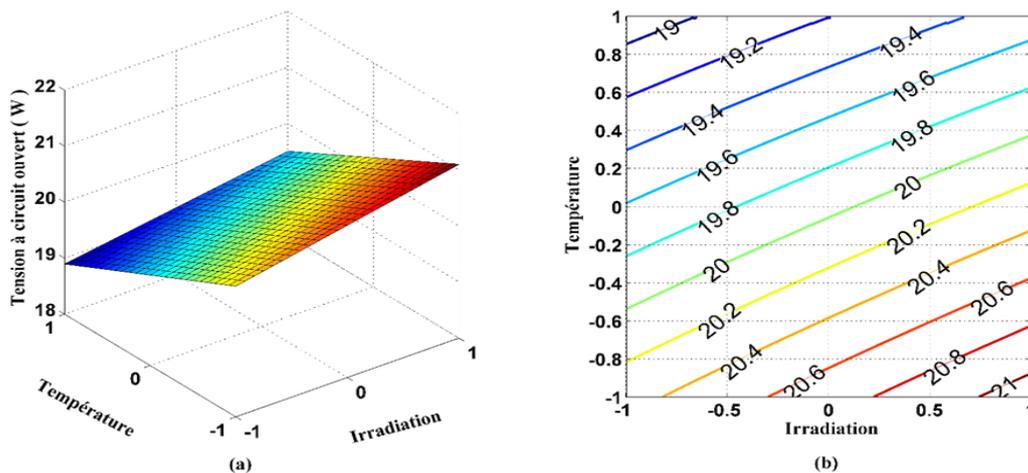


Fig. III.9. Surface de réponse et courbe de contour de la tension à circuit ouvert

Sur la figure III.10 on observe que la réponse courant de court-circuit possède un comportement similaire à la réponse puissance maximale sous la variation de l'irradiation solaire. Par contre, la direction du courant de court-circuit agit au sens inverse de la variation de la température. En somme, le courant de court-circuit augmente significativement avec l'irradiation solaire et légèrement avec la température de surface.

Le comportement du courant de court-circuit est nettement visible par les deux pentes des effets des facteurs qui affichent des valeurs bien remarquables entre eux (les pentes) et qui montrent la grande différence de l'influence des effets des facteurs sur la réponse courant de court-circuit.

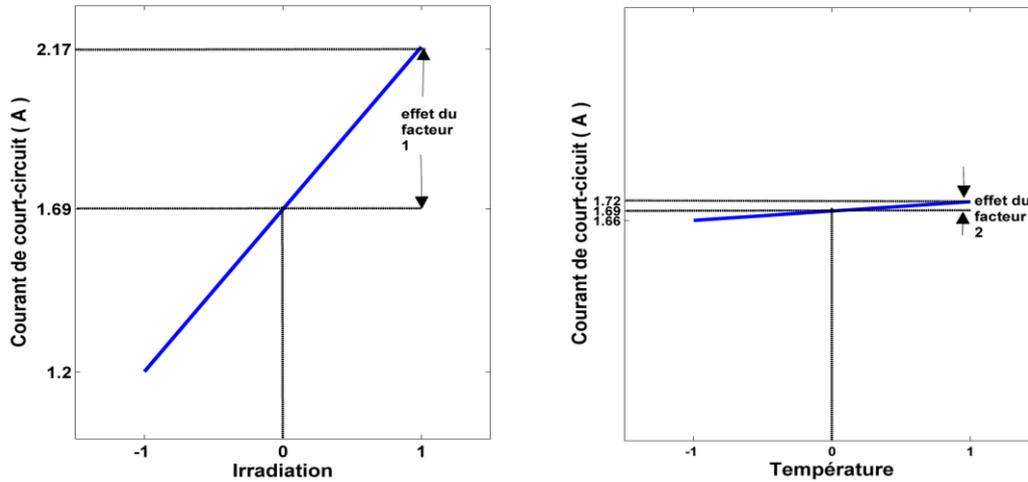


Fig. III.10. Illustration des effets des facteurs sur le courant de court-circuit

L'effet d'interaction, présenté en figure III.11, entre les facteurs est aussi présent mais avec une faible valeur. La variation du courant de court-circuit se fait dans le même sens que celui de l'interaction dont la variation des facteurs est simultanée.

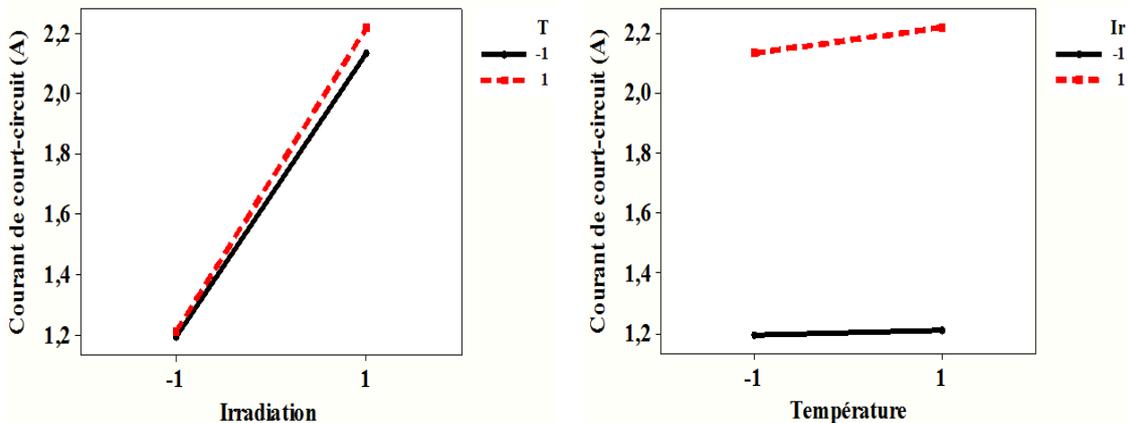


Fig. III.11. Illustration de l'effet d'interaction sur le courant de court-circuit

En figure III.12 sont consignés la surface de réponse du courant de court-circuit et la courbe de contour correspondante. Cette représentation graphique confirme ainsi le comportement de la réponse en fonction de l'irradiation solaire et de la température de surface. Le courant de court-circuit est fortement non dépend de la température et augmente proportionnellement avec l'irradiation.

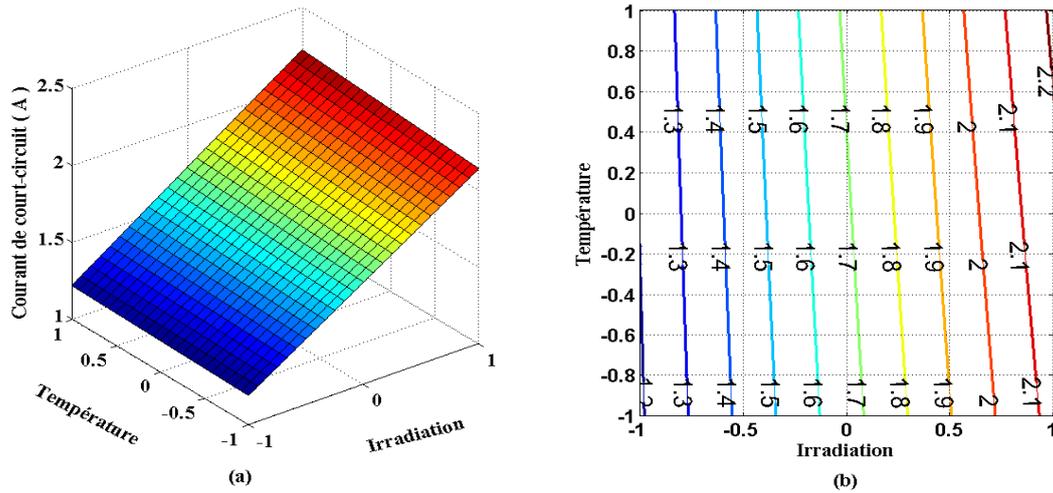


Fig. III.12. Surface de réponse et courbe de contour du courant de court-circuit

On déduit que la variation de la réponse courant de court-circuit est indépendante de la variation de la température ce qui a déjà décrit par le modèle de régression de l'analyse statistique.

III.6.3. Analyse statistique de la technique de surface de réponse

L'analyse statistique de la technique de surface de réponse est une analyse assez détaillée permettant d'étudier les termes quadratiques, en utilisant la méthode des moindres carrés pour résoudre les systèmes d'équations afin d'atteindre le modèle de régression multiple. D'où la nécessité de faire tout d'abord une analyse de criblage permettant d'éliminer les termes non significatifs présentant le moins d'influence sur la réponse désirée. Dans une première phase, cette technique d'analyse est appliquée pour estimer et modéliser les trois réponses du module PV multi-cristallin à savoir : la puissance maximale délivrée, la tension à circuit ouvert et le courant de court-circuit. Pour cela, le plan d'expérience choisi pour cette technique est constitué par 10 essais expérimentaux tirés du tableau 3.2. Les modèles de régressions multiples correspondants aux réponses du système sont déterminés après l'analyse de criblage, servant aux calculs des réponses estimées, et comparées avec celles de l'expérimentation. Grâce à la table 3.14, on peut évaluer la contribution de chaque facteur au modèle de la réponse choisie.

On remarque que les deux réponses : puissance maximale et courant de court-circuit présentent les mêmes contributions au facteur A avec plus de 96 %, suivi de l'effet du facteur AA avec un pourcentage au voisinage de 3%. Ensuite le facteur B contribue avec 0,21 % pour la puissance maximale et a moins d'influence sur le courant de court-circuit avec 0,05%, et enfin une faible contribution de l'interaction des deux facteurs. Le comportement de la réponse tension à circuit ouvert est différent des deux autres réponses, où l'effet du facteur B contribue avec environ 69 % contre 28 % de l'effet du facteur A ; une contribution de l'interaction est ainsi remarquable par rapport à l'interaction des deux autres réponses, elle est de 2,64 %, enfin une contribution de l'effet du facteur AA avec 0,38 %.

Table 3.14. Test des effets des paramètres des réponses désirées

Réponses	Source	Degré de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F Ratio	Contribution (%)
Puissance maximale	A : Ir	1	190,63207	190,63207	55940,94	96,51
	B : T	1	0,41607	0,41607	122,0947	0,21
	AB : Ir*T	1	0,07290	0,07290	21,3925	0,036
	AA : Ir*Ir	1	6,21574	6,21574	1824,009	3,146
	BB : T*T	1	0,0000107	0,0000107	0,0031	0,000
Tension en circuit ouvert	A : Ir	1	0,4266667	0,4266667	78,7692	28,175
	B : T	1	1,0416667	1,0416667	192,3077	68,787
	AB : Ir*T	1	0,0400000	0,0400000	7,3846	2,64
	AA : Ir*Ir	1	0,0058333	0,0058333	1,0769	0,385
	BB : T*T	1	0,0000248	0,0000248	0,0047	0,000
Courant de court-circuit	A : Ir	1	0,91806817	0,91806817	135710,9	96,86
	B : T	1	0,00050417	0,00050417	74,5271	0,053
	AB : Ir*T	1	0,00009025	0,00009025	13,3410	0,009
	AA : Ir*Ir	1	0,02838019	0,02838019	4195,224	2,99
	BB : T*T	1	0,00000119	0,00000119	0,1760	0,000

Une analyse de variance du modèle de régression sert à tester le modèle est-il acceptable ou non, selon que leur probabilité soit inférieur à la valeur critique de $\alpha = 5\%$. Dans cette table d'ANOVA, on constate que les trois modèles prédictifs des réponses choisies sont acceptés et donnent un bon ajustement aux modèles.

Table 3.15. Table d'ANOVA du modèle de régression des réponses désirées

Réponses	Source	Degré de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F Ratio	Probabilité
Puissance maximale	Modèle	5	197,51718	39,5034	11592,27	<0,0001*
	Erreur	4	0,01363	0,0034		
	Total	9	197,53081			
Tension en circuit ouvert	Modèle	5	1,5143333	0,302867	55,9138	0,0009*
	Erreur	4	0,0216667	0,005417		
	Total	9	1,536000			
Courant de court-circuit	Modèle	5	0,94779184	0,189558	28020,95	<0,0001*
	Erreur	4	0,00002706	0,00000676		
	Total	9	0,94781890			

L'analyse de variance permettra d'estimer les coefficients des modèles prédictifs des réponses désirées de cette étude, ainsi que leurs probabilités, justifiant leurs significativité sur la variation des réponses. Selon la table 3.16, les réponses puissance maximale et courant de court-circuit préservent les mêmes effets des facteurs, contrairement à la réponse tension à circuit ouvert qui ne dépend que de l'effet de la température et de l'irradiation solaire.

L'utilisation du modèle mis en œuvre considérant les résidus comme présenté par l'équation III.4 ci-dessus et après cette précédente phase d'analyse nous permet d'obtenir le modèle de la réponse estimée de la puissance maximale, via l'équation suivante :

$$P_m = 16,546 + 5,636x_1 - 0,263x_2 - 0,135x_1x_2 + 1,632x_1^2 \quad \text{(III.10)}$$

Grâce à cette Eq. III.10, la puissance maximale pour les facteurs x_1 et x_2 peut être calculée, à condition que ces valeurs soient incluses dans le domaine expérimental d'étude.

Table 3.16. Estimation des paramètres du modèle de la régression des réponses désirées

Réponses	Terme	Coefficients	Erreur Standard	T_Student	Probabilité
Puissance maximale	Intercepte	16,546429	0,034886	474,30	<0,0001*
	A : Ir	5,6366667	0,023832	236,52	<0,0001*
	B : T	-0,263333	0,023832	-11,05	0,0004*
	AB : Ir*T	-0,135	0,029188	-4,63	0,0098*
	AA : Ir*Ir	1,6321429	0,038216	42,71	<0,0001*
	BB : T*T	0,0021429	0,581194	0,06	0,9580
Tension à circuit ouvert	Intercepte	19,65	0,043983	446,76	<0,0001*
	A : Ir	0,2666667	0,030046	8,88	0,0009*
	B : T	-0,416667	0,030046	-13,87	0,0002*
	AB : Ir*T	-0,1	0,036799	-2,72	0,0531
	AA : Ir*Ir	0,05	0,048181	1,04	0,3580
	BB : T*T	0,003263	0,048181	0,00	1,0000
Courant de court-circuit	Intercepte	1,2033571	0,001554	774,18	<0,0001*
	A : Ir	0,3911667	0,001062	368,39	<0,0001*
	B : T	0,0091667	0,001062	8,63	0,0010*
	AB : Ir*T	0,00475	0,0013	3,65	0,0217*
	AA : Ir*Ir	0,112857	0,001703	64,77	<0,0001*
	BB : T*T	-0,000714	0,001703	-0,42	0,6964

En suivant la même procédure que ci-dessus utilisé pour la puissance dans le cas de 4 essais, les modèles mis en œuvre pour le courant de court-circuit et les réponses en tension à

circuit ouvert du module PV multi-cristallin peuvent également être obtenus dont nous avons trouvé :

$$I_{cc} = 1,203 + 0,391x_1 + 0,009x_2 + 0,004x_1x_2 + 0,11x_1^2 \quad (III.11)$$

$$V_{co} = 19,65 + 0,266x_1 - 0,416x_2 \quad (III.12)$$

Dans les équations III.10, III.11 et III.12 ci-dessus décrivant les modèles mis en œuvre pour les sorties pertinentes, le facteur nous informe principalement sur l'amplitude et la direction des changements de la réponse dont certaines conclusions initiales peuvent être tirées. Si nous prenons à titre d'exemple dans ces trois modèles prédictifs, le coefficient correspondant à l'éclairement a_1 (coefficient de x_1) est positif ce qui correspond aux variations de la réponse dans le même sens que les variations de l'éclairement. On peut donc conclure que la puissance maximale, le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert du module multi-cristallin, respectivement donnés par leurs modèles mis en œuvre, varient dans le même sens que les variations de l'irradiation solaire, ce qui confirme les comportements connus des panneaux PV multi-cristallins (ceci sera aussi confirmé, comme nous le verrons par la suite dans le cas des panneaux basés sur les autres technologies.

Par ailleurs, dans toutes ces équations, les coefficients a_1 liés à l'irradiation solaire sont significativement supérieures aux coefficients a_2 liés à la température, ce qui détermine que l'influence de l'intensité de l'irradiation solaire est plus significative que celle de la température de surface sur la réponse pour une même amplitude de variation de ses paramètres d'entrée.

On peut aussi noter que le coefficient a_2 a un signe positif dans l'équation III.11 et un signe négatif dans les équations III.10 et III.12. Cela traduit la direction de la variation de la réponse en fonction de la variation du facteur x_2 . Cette différence de signe et de valeur en a_2 pour les différentes réponses confirme également le comportement réel d'un panneau PV en silicium en fonction de la température qui se traduit par une légère augmentation du courant de court-circuit et une diminution de la puissance maximale et de la tension à circuit ouvert.

Les valeurs des réponses expérimentales, les valeurs des réponses estimées ainsi que les erreurs calculées entre ces valeurs sont résumées dans le tableau des résultats obtenus par les modèles en équations III.10, III.11 et III.12 des trois réponses désirées du module multi-cristallin.

Pour le modèle de régression de la réponse puissance maximale régi par l'équation III.10, le coefficient de détermination (R^2) vaut 0,999845. Ceci indique la grande qualité et la pertinence de la valeur de la puissance maximale exprimée par le modèle de régression. Avec une erreur quadratique moyenne $RMSE$ égale à 0,058376, nous pouvons conclure que le modèle ajuste bien la puissance maximale.

Le modèle que nous avons développé à partir des essais expérimentaux peut ainsi être accepté en toute fidélité pour la modélisation de la puissance maximum que le panneau PV multi-cristallin peut fournir.

Table 3.17. Erreur calculée entre réponses calculée et observée de trois réponses du module multi-cristallin
Multi-cristallin(Exp.: Données Expérimentales; Mod.: Données Calculées du modèle prédictif; E_r (%).

N°	Puissance Maximale (W)			Courant de court-circuit (A)			Tension à circuit ouvert (V)		
	Exp.	Mod.	E_r	Exp.	Mod.	E_r	Exp.	Mod.	E_r
01	12,66	12.66	0.01	0.918	0.92	0.22	19.7	19.73	0.15
02	12,56	12.55	-0.06	0.92	0.92	0	19.5	19.46	-0.21
03	16,41	12.42	0.1	0.928	0.93	0.22	19.1	19.11	0.05
04	16,79	16.81	0.15	1.193	1.19	-0.25	20,1	20.07	-0.15
05	16,60	16.62	0.1	1.204	1.2	-0.33	19.7	19.76	0.3
06	16,55	16.48	-0.4	1.206	1.21	0.33	19.6	19.56	-0.2
07	16,25	16.27	0.13	1.209	1.21	0.08	19.2	19.21	0.05
08	24,25	24.22	-0.13	1,69	1.69	0	20.5	20.49	-0.05
09	23,74	23.79	0.22	1.704	1.71	0.35	19.9	19.93	0.15
10	23,46	23.44	-0.1	1.719	1.72	0.06	19,5	19.48	-0.1

De même, les coefficients de corrélation multiple ajusté (R^2) des modèles de régressions, équations III.11 et III.12, valent 0.968262 et 0,999936, et leurs erreurs quadratiques moyennes $RMSE$ valent 0,073598 et 0,002601, respectivement. Cela exprime un bon ajustement par le modèle de régression pour le courant de court-circuit et la tension à circuit ouvert. Donc, les modèles que nous développés à partir des essais expérimentaux peuvent également être acceptés en toute fidélité pour la modélisation du courant de court-circuit et de la tension à circuit ouvert avec un bon ajustement.

Dans une seconde partie de cette étude, avec la même procédure que précédemment, nous avons utilisé un autre plan d'expérience constitué de 15 essais, où les points expérimentaux sont distribués dans le domaine d'étude du plan choisi. Avec la méthode des moindres carrés, on a obtenu les coefficients du modèle donné par l'équation III.13 suivante :

$$\hat{a} = \begin{bmatrix} 21,6742 \\ 9,3434 \\ -0,3436 \\ -0,2253 \\ 0,2961 \\ -0,0745 \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

La substitution de ces coefficients dans l'équation III.4, donne lieu au modèle prédictif de la puissance maximale et de la même manière on obtient les modèles prédictifs des autres modules, les trois modèles sont donnés par l'équation III.14 suivant :

$$\begin{cases} P_{m_multi} = 21,674 + 9,343x_1 - 0,343x_2 - 0,225x_1x_2 + 0,296x_1^2 - 0,074x_2^2 \\ P_{m_mono} = 16,517 + 6,742x_1 - 0,351x_2 + 0,032x_1x_2 + 0,119x_1^2 - 0,288x_2^2 \\ P_{m_amorp} = 3,493 + 1,746x_1 - 0,0742x_2 - 0,011x_1x_2 - 0,058x_1^2 - 0,011x_2^2 \end{cases} \text{ (III.14)}$$

De la même façon, on obtient les modèles prédictifs des deux autres réponses du module multi-cristallin ainsi que les réponses des deux autres modules PV.

A partir de ces modèles on calcule les réponses estimées qui vont être par la suite comparées avec celles d'expérimentation. Les résultats obtenus sont résumés dans les tableaux ci-dessous.

Table 3.18. Calcul d'erreur entre les valeurs expérimentales et calculés du modèle prédictif de la puissance maximale

Puissance Maximale (W)									
(Exp.: Données Expérimentales; Mod.: Données Calculées du modèle prédictif; E_r (%)).									
Multi-cristallin				Monocristallin			Amorphe		
N°	Exp.	Mod.	E_r	Exp.	Mod.	E_r	Exp.	Mod.	E_r
01	12,66	12.66	0.01	9,93	9,99	0,57	1,77	1,74	-1,57
02	12,59	12.67	0.6	9,92	10,02	1,03	1,75	1,72	-1,63
03	12,56	12.68	0.97	9,87	9,98	1,08	1,75	1,7	-2,93
04	16,41	12.41	0.02	9,86	9,87	0,05	2,49	2,55	2,53
05	16,79	16.6	-1.11	12,83	12,73	-0,77	2,47	2,53	2,27
06	16,60	16.54	-0.38	12,92	12,70	-1,67	2,49	2,51	0,95
07	16,55	16.45	-0.58	12,75	12,62	-0,99	2,46	2,5	1,62
08	16,25	16.21	-0.24	12,33	12,25	-0,68	2,46	2,48	0,83
09	24,25	24.14	-0.46	18,12	18,17	0,25	3,94	3,93	-0,38
10	23,90	24.04	0.57	18,03	18,08	0,26	3,9	3,87	-0,84
11	23,74	23.9	0.69	17,77	17,84	0,4	3,93	3,82	-2,92
12	23,46	23.57	0.45	17,40	17,58	1,06	5,21	5,23	0,33
13	31,52	31.55	0.11	23,43	23,40	-0,14	5,21	5,18	-0,67
14	31,00	30.87	-0.41	23,28	23,33	0,23	5,12	5,12	-0,01
15	30,29	30.28	-0.03	22,91	22,77	-0,61	5,03	5,08	1,08

Pour le modèle de régression multiple décrivant la puissance maximale des trois modules, le coefficient de corrélation multiple et l'erreur quadratique sont résumés dans le tableau suivant :

Table 3.19. Coefficient de corrélation et l'erreur quadratique des trois modules de la réponse puissance maximale

	Multi-cristallin	monocristallin	Amorphe
R^2_adj	0,99968	0,9995	0,9987
$RMSE$	0,12656	0,13807	0,060418

Ces résultats révèlent une bonne précision des modèles prédictifs permettant d'être confiants pour l'ajustement des points expérimentaux. De la même façon, on obtient les modèles prédictifs de la réponse tension à circuit ouvert pour les trois modules PV de l'étude comme suivent :

$$\begin{cases} V_{co_multi} = 20,003 + 0,534x_1 - 0,539x_2 - 0,225x_1x_2 + 0,296x_1^2 \\ V_{co_mono} = 20,144 + 0,423x_1 - 0,699x_2 + 0,162x_1x_2 + 0,104x_1^2 + 0,038x_2^2 \\ V_{co_amorp} = 18,912 + 0,665x_1 - 0,444x_2 - 0,176x_1x_2 - 0,255x_1^2 - 0,016x_2^2 \end{cases} \quad (III.15)$$

La reconstitution des valeurs des facteurs CCR dans le modèle de l'équation III.15, on obtient des réponses calculées mentionnées dans le tableau 3.20, ainsi que l'erreur entre ces réponses avec celles mesurées.

Table 3.20. Calcul d'erreur entre les valeurs expérimentales et calculés du modèle prédictif de la tension à circuit ouvert

Tension à circuit ouvert (V)										
(Exp.: Données Expérimentales; Mod.: Données Calculées du modèle prédictif; E_r (%))										
		Multi-cristallin			Monocristallin			Amorphe		
N°	Exp.	Mod.	E_r	Exp.	Mod.	E_r	Exp.	Mod.	E_r	
01	19.7	19.73	0.15	20.1	20.19	0.45	18.3	18.24	-0.33	
02	19.6	19.68	0.41	19.9	19.92	0.1	18,1	18.15	0.28	
03	19.5	19.54	0.21	19.7	19.77	0.36	18	18.05	0.28	
04	19.1	19.01	-0.47	19,6	19.59	-0.05	18.7	18.68	-0.11	
05	20,1	19.93	-0.85	20.5	20.37	-0.63	18.6	18.56	-0.22	
06	19.7	19.74	0.2	20,1	20.04	-0.3	18.5	18.47	-0.16	
07	19.6	19.57	-0.15	19,9	19.86	-0.2	18.4	18.39	-0.05	
08	19.2	19.26	0.31	19,6	19.48	-0.61	18.3	18.32	0.11	
09	20.5	20.32	-0.88	20,5	20.5	0	19,3	19.36	0.31	
10	20.1	20.16	0.3	20,3	20.23	-0.34	18.9	19	0.53	
11	19.9	19.97	0.35	19,8	19.87	0.35	18.8	18.7	-0.53	
12	19,5	19.62	0.62	19,4	19.64	1.24	19.7	19.7	0	
13	20,7	20.77	0.34	20,5	20.54	0.2	19.4	19.35	-0.26	
14	20	19.96	-0.2	20,3	20.35	0.25	19	18.94	-0.32	
15	19.5	19.45	-0.26	19.8	19.64	-0.81	18.6	18.68	0.43	

Table 3.21. Coefficient de corrélation et l'erreur quadratique des trois modules de la réponse tension à circuit ouvert

	Multi-cristallin	monocristallin	Amorphe
R^2_{adj}	0,99968	0,9995	0,9987
$RMSE$	0,12656	0,13807	0,060418

Ces résultats révèlent une bonne précision des modèles prédictifs permettant d'être confiants pour l'ajustement des points expérimentaux.

De la même façon, on obtient les modèles prédictifs de la réponse tension de circuit ouvert pour les trois modules PV de l'étude :

$$\begin{cases} I_{cc_multi} = 1,548 + 0,6284x_1 + 0,021x_2 + 0,014x_1x_2 + 0,01x_1^2 \\ I_{cc_mono} = 1,171 + 0,456x_1 + 0,016x_2 + 0,023x_1x_2 - 0,021x_2^2 \\ I_{cc_amorp} = 0,264 + 0,124x_1 + 0,001x_2 + 0,004x_1x_2 - 0,005x_1^2 \end{cases} \quad (III.16)$$

La reconstitution des valeurs des facteurs CCR dans le modèle de l'équation III.16 nous permet d'obtenir les réponses calculées mentionnées dans le tableau 3.22, ainsi que l'erreur entre ces réponses et celles mesurées.

Table 3.22. Calcul d'erreur entre les valeurs expérimentales et calculés du modèle prédictif du courant de court-circuit

Courant de court-circuit (A)									
(Exp.: Données Expérimentales; Mod.: Données Calculées du modèle prédictif; E_r (%))									
N°	Multi-cristallin			Monocristallin			Amorphe		
	Exp.	Mod.	E_r	Exp.	Mod.	E_r	Exp.	Mod.	E_r
01	0.918	0.92	0.22	0.706	0.71	0.57	0.138	0.14	1.45
02	0.918	0.92	0.22	0.712	0.72	1.12	0.138	0.14	1.45
03	0.92	0.93	1.09	0.716	0.72	0.56	0.139	0.13	-6.47
04	0.928	0.93	0.22	0.719	0.72	0.14	0.19	0.19	0
05	1.193	1.19	-0.25	0.894	0.89	-0.45	0.19	0.19	0
06	1.204	1.19	-1.16	0.918	0.9	-1.96	0.192	0.19	-1.04
07	1.206	1.2	-0.5	0.915	0.91	-0.55	0.191	0.19	-0.52
08	1.209	1.2	-0.74	0.899	0.9	0.11	0.192	0.19	-1.04
09	1,69	1.7	0.59	1.263	1.27	0.55	0.292	0.29	-0.68
10	1,699	1.7	0.06	1.269	1.28	0.87	0.295	0.29	-1.69
11	1.704	1.71	0.35	1.282	1.28	-0.16	0.299	0.29	-3.01
12	1.719	1.72	0.06	1.281	1.28	-0.08	0.378	0.38	0.53
13	2.175	2.17	-0.23	1,633	1.63	-0.18	0.384	0.38	-1.04
14	2.214	2.21	-0.18	1.638	1.64	0.12	0.385	0.39	1.3
15	2.219	2.22	0.05	1.653	1.65	-0.18	0.386	0.39	1.04

Nous pouvons alors comme précédemment, conclure que, ces résultats révèlent une bonne précision des modèles prédictifs permettant d'être confiants pour l'ajustement des points expérimentaux.

Table 3.23. Coefficient de corrélation et l'erreur quadratique des trois modules de la réponse courant de court-circuit

	Multi-cristallin	monocristallin	Amorphe
R^2_{adj}	0,99984	0,99962	0,99796
RMSE	0,006227	0,008563	0,005467

III.6.4. Analyse graphique de la technique de surface de réponse

Pour la validation des différentes réponses effectuées via les simulations, les modèles implémentés précédemment calculés doivent être comparés aux mesures expérimentales avec une quantification de l'erreur relative entre les deux. La technique de surface de réponse permet de déterminer comment la réponse varie en fonction des facteurs pertinents déjà jugés par la technique de criblage, afin d'optimiser le modèle prédictif et par ailleurs la réponse désirée.

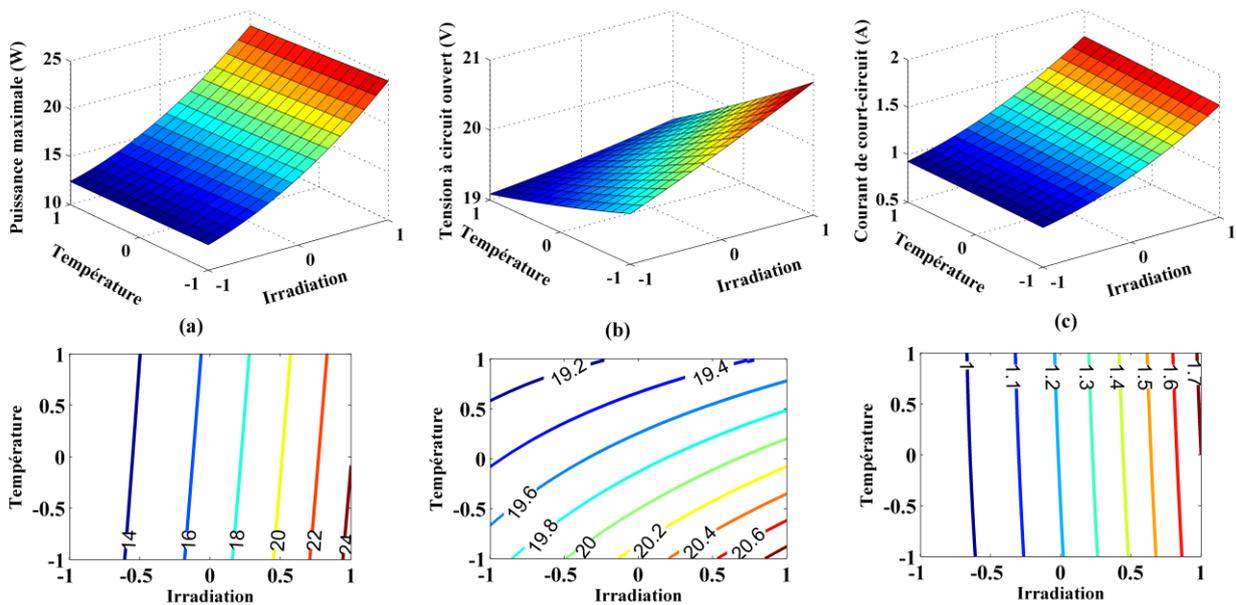


Fig. III.13. Surface de réponses et courbes de contours des trois réponses du module multi-cristallin

Sur la figure III.13, on remarque que la puissance maximale délivrée par un module multi-cristallin varie fortement avec l'irradiation solaire et dans la même direction. Par contre, cette réponse est moins dépendante de la température comme indiqué par le modèle de régression multiple. Ce comportement de la puissance maximale est identique à celui du courant de court-circuit qui possède une forte liaison avec l'irradiation solaire et ne présente quasiment aucune dépendance avec la température de surface.

A partir de tableau 3.18, on peut remarquer que la puissance maximale calculée par la méthode *DoE* est proche de celle mesurée par les essais expérimentaux indiquant que tous les points expérimentaux sont inclus dans le domaine expérimental choisi.

La figure III.14 ci-après présente la surface de la puissance maximale en fonction de la température et de l'irradiation pour les trois technologies de modules photovoltaïques.

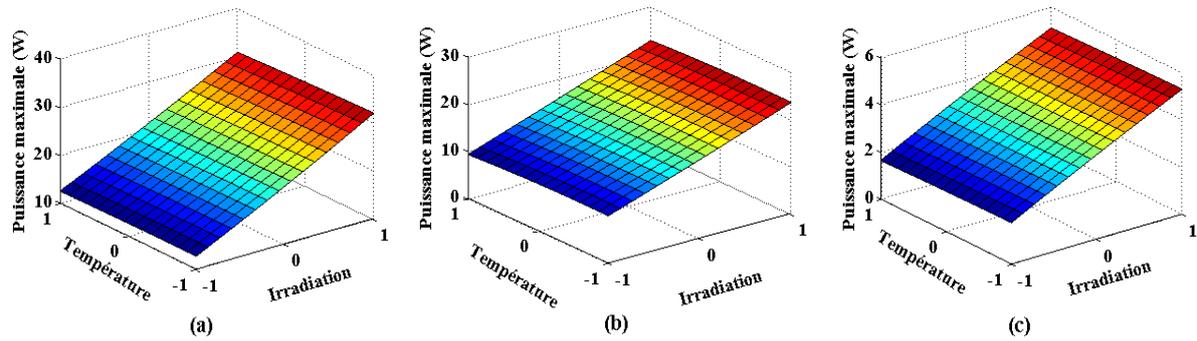


Figure III.14. Surface de la réponse de puissance maximale des modèles de régression multiple, (a) multi-cristallin, (b) monocristallin et (c) amorphe respectivement

Plus d'informations sur l'influence des deux facteurs considérés, l'irradiation et la température, sur la réponse maximale de puissance peuvent être obtenues à partir des courbes de contour reportées sur la figure III.15.

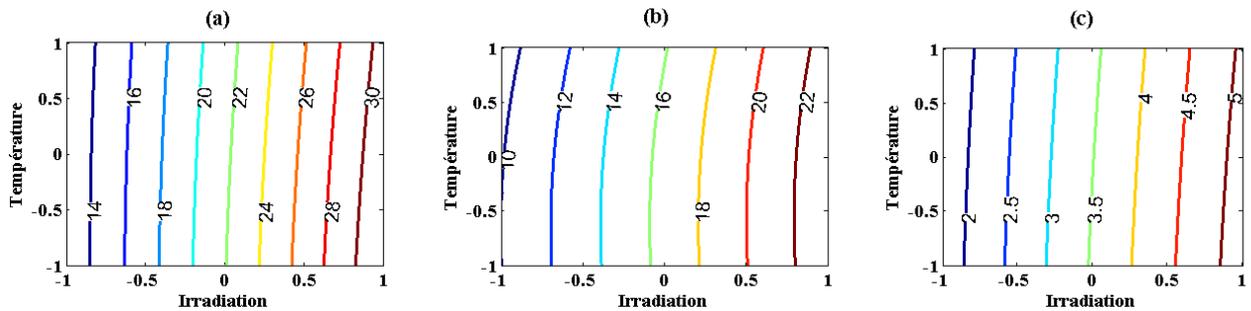


Fig. III.15. Courbes de contour de la réponse de puissance maximale des modèles de régression multiple, (a) multi-cristallin, (b) monocristallin et (c) amorphe respectivement

Nous pouvons clairement voir que pour le module multi-cristallin Fig. III.15-a, la réponse puissance maximum augmente avec l'irradiation et diminue significativement avec la température pour des niveaux d'irradiation faibles mais elle est insignifiante pour des niveaux élevés. Il est à noter que pour un même contour d'irradiation, l'augmentation de température fait diminuer la puissance délivrée par le panneau. Le même comportement peut être observé pour le module monocristallin, Fig. III.15-b, mais quel que soit le niveau d'irradiation, l'effet de la température est moindre que pour le module multi-cristallin. Enfin, pour le module amorphe, Fig. III.15-c, la réponse de la puissance maximale augmente avec l'irradiation et, contrairement aux deux modules cristallins, augmente significativement avec la température pour des niveaux d'irradiation faibles devenant insignifiants pour des niveaux élevés d'irradiation.

Il est important de noter que ces comportements déduits de la méthode *DoE* sont en accord avec ce qui est observé et attendu expérimentalement. Ils sont directement liés aux propriétés physiques et électroniques spécifiques des modules car le monocristallin est plus pur que le module silicium multi-cristallin et le module de technologie amorphe n'a pas été conçu pour être exposé à des niveaux élevés d'irradiation.

Des vérifications similaires ont été utiles pour les réponses tension à circuit ouvert et courant de court-circuit en fonction des variations des facteurs d'irradiation et de température. Les corrélations de la réponse de surface et des courbes de contour sont données en figures III.16 et III.17 ci-dessous respectivement.

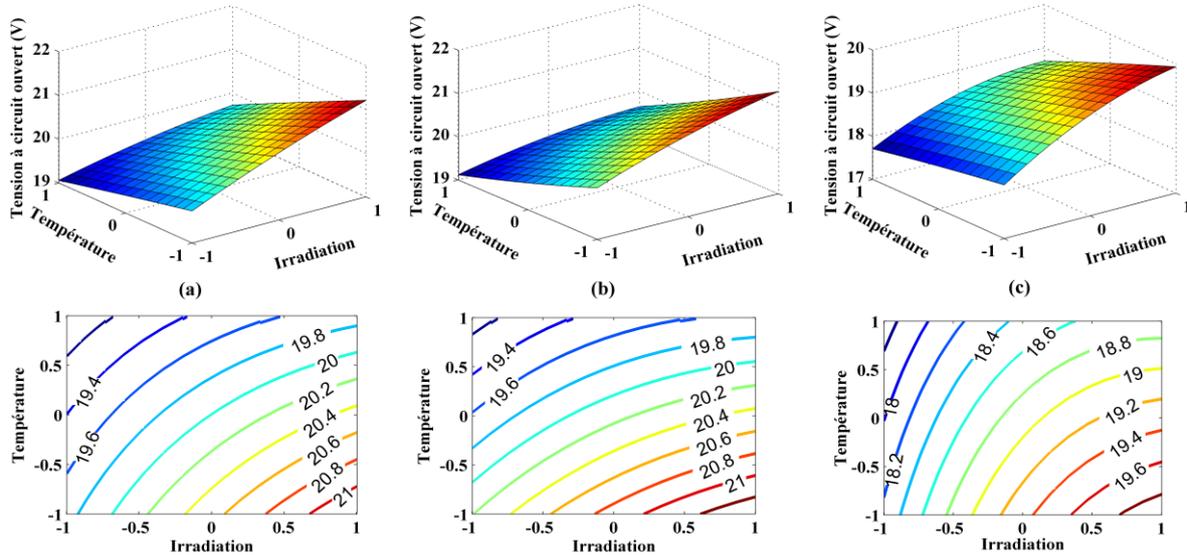


Fig. III.16. Surfaces de réponses et courbes de contour de la réponse tension à circuit ouvert des modèles de régression multiple, (a) multi-cristallin, (b) monocristallin et (c) amorphe respectivement

De la figure III.16, on remarque que la réponse tension à circuit ouvert possède le même comportement pour les trois modules PV, elle est fortement liée au facteur température de surface et dans des directions de variation inverse, contrairement au facteur irradiation solaire où elle varie dans le même sens et moins d'influence que le facteur température de surface.

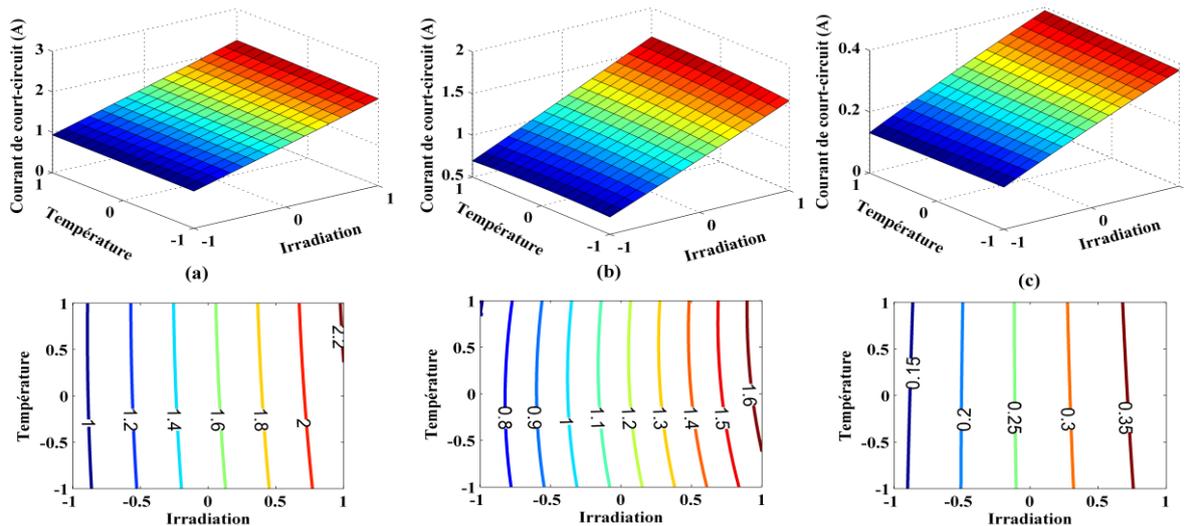


Fig. III.17. Surfaces de réponses et courbes de contour de la réponse courant de court-circuit des modèles de régression multiple, (a) multi-cristallin, (b) monocristallin et (c) amorphe respectivement

Cependant, la réponse courant de court-circuit donnée par la figure III.17 ne dépend quasiment qu'avec le facteur irradiation solaire et varie dans la même direction de variation du facteur influençant. Cette réponse ne présente aucune liaison avec le facteur température de surface.

Avant de conclure cette étude, non pas sur l'utilisation de la méthode *DoE* mais par une analyse des performances comparée des performances respectives des panneaux PV de différentes technologies, performances modélisées et prédites par la méthode *DoE*, nous introduisons une nouvelle figure de mérite qui est le rapport de performance de puissance, RPP des panneaux. Cette figure de mérite a été introduite initialement Congedo *et al* en 2013 [Cong13] et largement repris dans la littérature comme par Gao *et al* plus récemment [Gao18].

Le modèle prédictif du module PV multi-cristallin ($50 W_c$) donne une puissance maximale de $31,52 W$ à une température de surface de $32,6 ^\circ C$ et sous une irradiation solaire de $1849 W/m^2$, ce qui correspond à un rapport de performance de puissance (RPP) égal à $62,7\%$. En revanche, le module PV monocristallin ($40 W_c$) donne une puissance maximale de $23,4 W$ à une température de $36,3 ^\circ C$ et une irradiation de $1781 W/m^2$ correspondant à un RPP égal à $58,1\%$. Enfin, le module PV amorphe ($14 W_c$) donne une puissance maximale de $5,21 W$ pour une irradiation de $1791 W/m^2$ et une température de $36,8 ^\circ C$, soit un RPP égal à $37,2 \%$ également. Bien que nos essais expérimentaux ont été réalisés en interne au laboratoire, (indoor), ces valeurs du facteur de mérite RPP correspondent bien à ce qui est attendu par les différentes technologies avec une meilleure performance des panneaux monocristallin et une faible efficacité pour le panneau en technologie silicium amorphe.

III.7. Conclusion

Nous avons démontré l'intérêt de la méthode *DoE* et de sa mise en œuvre pour la caractérisation et la modélisation de modules photovoltaïques, validés sur trois technologies de silicium : multi-cristalline, monocristalline et amorphe. Sur la base de cette méthode, nous avons modélisé le comportement des différents types de panneaux et montré que la méthode *DoE* est une méthode de modélisation pratique avec une mise en œuvre ne nécessitant que quelques mesures pour les variables d'entrée (facteurs) et les sorties (réponse) tout en permettant d'obtenir une précision satisfaisante.

Pour cibler cet objectif principal, un banc expérimental a été installé dans le laboratoire utilisé pour réaliser des expériences afin de mesurer les facteurs d'entrée : niveaux d'irradiation et variations de température des modules PV ainsi que la mesure des facteurs de production tels que courant de circuit et la tension à circuit ouvert. Le facteur de production restant, à savoir la puissance maximale disponible sur le panneau PV, a été calculé pour chaque fonction expérimentale du niveau d'irradiation et de la température.

Nous avons observé une dépendance plus élevée des réponses puissance maximale et courant de court-circuit avec l'irradiation par rapport à la température, tandis que la réponse tension à circuit ouvert est inversement et fortement liée aux variations de température.

Ce travail souligne que la méthode *DoE* reproduit fidèlement les caractéristiques des modules PV construits par les trois technologies principales actuellement utilisées, évitant le développement d'une lourde phase expérimentale de caractérisation. La faible différence entre les paramètres fonctionnels des modules PV, obtenus expérimentalement et par la méthode *DoE*, confirme que la méthode *DoE* est un outil efficace, précis et précieux et bien adapté à la modélisation de modules photovoltaïques.

CHAPITRE IV

Chapitre IV

Modélisation, simulation et caractérisation de bus continu HVDC par la méthode DOE

IV.1. Introduction.....	1100
IV.2. Caractéristiques du bus continu HVDC.....	1111
IV.3. Caractérisation et expérimentation.....	1122
IV.4. Modélisation mathématique du bus continu HVDC	1177
IV.5. Résultats et interprétation	1188
IV.6. Conclusion	1422

IV.1. Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque est l'une des sources renouvelables futures de la production d'énergie électrique, elle est prometteuse, gratuite et écologique. Cependant, l'énergie électrique produite à travers des générateurs photovoltaïques GPVs doit être utilisée pour diverse application que ce soit pour l'alimentation d'une charge [Sury11], d'une batterie pour les systèmes autonomes dans les sites isolés [Pami19] ou injectée dans le réseau de distribution d'énergie électrique [Arab18].

Nous savons que les GPVs ne fournissent que quelques volts à sa sortie avec une puissance aléatoire qui varie selon les conditions météorologiques d'illumination et de température. La caractéristique $I(V)$ résultante a toujours la même allure qui présente des non-linéarités. Les changements des paramètres d'environnement (ensoleillement en présence d'ombrage, la température ambiante et la vitesse du vent ...etc.) affectent fortement cette caractéristique. Le point de puissance maximale PPM est en conséquence modifié en permanence [Allo17].

Il s'avère intéressant d'élever la tension de sortie d'un système photovoltaïque. En ce sens plusieurs recherches ont été menées pour augmenter la tension de sortie et par ailleurs pour maintenir le fonctionnement du système au point PPM. En effet, un étage d'adaptation DC/DC est intercalé entre la charge continue DC et le GPV. L'étage d'adaptation n'est autre qu'un convertisseur DC/DC doté d'une commande (analogique ou numérique) qui assure la poursuite du point de puissance maximale PPM [Peti12, Kaly14]. Le MPP se déplace avec la variation des paramètres environnementaux. Pour pallier aux pertes de puissance suite à ce phénomène la solution d'insérer un Boost entre la charge et le panneau PV est très utilisée de nos jours. La spécificité est de connecter la sortie du Boost à un bus haute tension continue (Bus HVDC : High Voltage Direct Current Bus). Le rôle principal du Boost est l'adaptation de l'impédance de la charge à l'impédance du générateur PV pour avoir un transfert maximal de puissance. Cette manière collabore assez à la réduction des pertes d'énergie [Allo17].

Notre travail de thèse s'est déroulé à l'Université de Lorraine et CentraleSupélec, dans le Laboratoire de Matériaux Optiques, Photoniques et Systèmes LMOPS, Metz, France, là où un convertisseur DC/DC est propre et fabriqué au laboratoire LMOPS, ce convertisseur Boost ou élévateur de tension est doté d'un circuit de couplage magnétique (Magnetic Coupled Boost MCB). Un bus continu haute tension (High Voltage Direct Current HVDC) servant de transporter l'énergie électrique produite à la charge, il est capable d'assurer une tension allant de 200 V à 1KV [Peti11b, Zega14, Allo15].

Dans le présent chapitre, par une nouvelle étude qui peut être considérée, soit comme une extension et validation de nos premiers travaux présentés dans les chapitres précédents, soit également de façon tout aussi originale d'une nouvelle application de la méthode aux énergies renouvelables, nous nous sommes attachés à modéliser, simuler et caractériser le bus continu photovoltaïque, HVDC, par la méthode des plans d'expérience (*DoE*), en tenant compte des caractéristiques de module photovoltaïque au silicium et de la charge. Dans une première partie, une modélisation mathématique du bus HVDC est faite, suivie d'une étape d'expérimentation

et d'enlèvement des données d'entrées du système étudié puis une intégration de ces données dans un programme de simulation sous l'environnement logiciel MATLAB, ainsi qu'une comparaison des résultats obtenus avec ceux d'expériences.

Enfin, un tracé des caractéristiques est fait accompagné par des tableaux comportant les écarts entre les valeurs expérimentales et les valeurs calculées. Une validation des résultats obtenus avec les interprétations correspondantes.

IV.2. Caractéristiques du bus continu HVDC

Notre système d'étude est basé sur l'alimentation d'une charge par une source d'énergie PV via un bus HVDC, nécessitant le passage par un étage d'adaptation qui comporte un hacheur boost MCB doté d'une commande permettant l'extraction de la puissance maximum grâce à un algorithme de suivi (Maximum Power Point Tracker, MPPT), utilisé pour convertir une tension continue non régulé à l'entrée fournie par le GPV en une tension régulée à la sortie. Le suivi du point de puissance maximum est réalisé par la variation du rapport cyclique de l'interrupteur (Mosfet) du convertisseur.

La méthode *DoE* considère le système étudié comme étant une boîte noire. Cela veut dire que l'on ne s'intéresse pas à l'architecture interne de l'étage d'adaptation mais uniquement aux entrées et aux sorties du système. Les entrées du système sont l'irradiation solaire, la température de surface du GPV et les sorties le courant du bus HVDC, la tension du bus HVDC et la puissance du bus HVDC fournie à la charge.

La caractéristique $I(V)$ est une caractéristique importante, elle résume le comportement du système PV sous le changement des conditions d'utilisations. Dans ce chapitre on s'intéresse à la caractéristique $I(V)$ du bus continu HVDC, qui présente cependant la dépendance de cette caractéristique avec le changement simultanée de l'irradiation solaire et la température de surface de module PV comme le montre la figure IV.1.

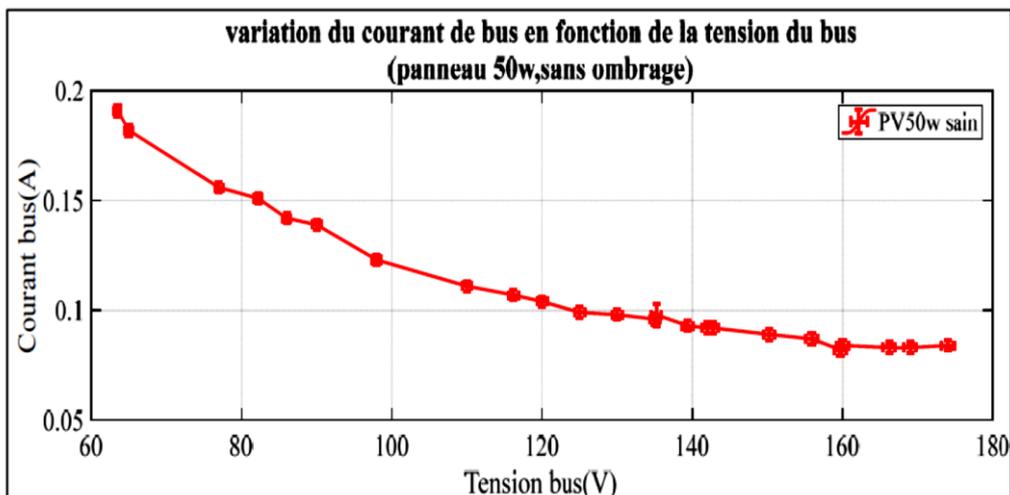


Fig. IV.1. Variation du courant de bus en fonction de la tension de bus dans des conditions variables [Allo17]

Allouache dans ces travaux de recherches dans le laboratoire LMOPS [Allo17] à montrer la variation de la caractéristique $I_{bus}(V_{bus})$ courant de bus (I_{bus}) en fonction de la tension de bus (V_{bus}) sous des conditions variables. La caractéristique $I_{bus}(V_{bus})$ est fortement dégradée avec la baisse de l'irradiation solaire et la hausse augmentation de la température de module PV. La figure IV.2 illustre la variation de la caractéristique $I_{bus}(V_{bus})$ dans différentes conditions d'utilisation.

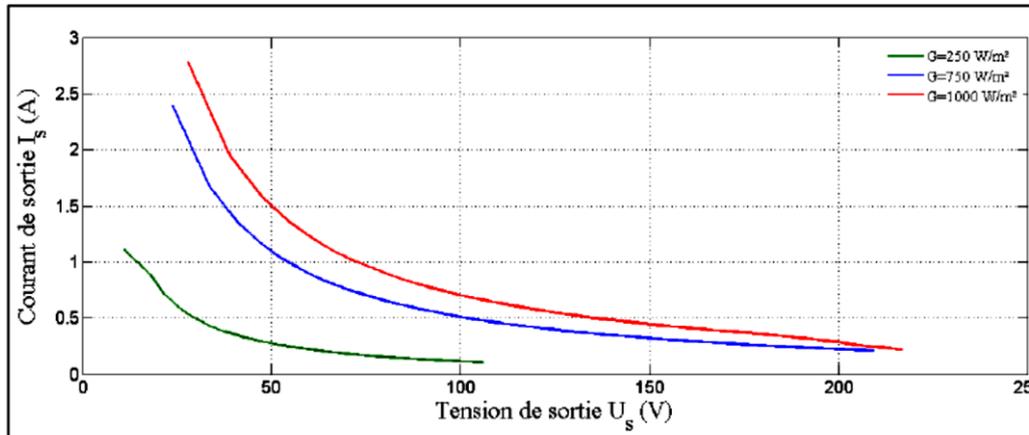


Fig. IV.2. Simulation du courant de bus en fonction de la tension de bus dans des conditions variables [Allo17]

Notre contribution est de caractériser et de modéliser le bus continu en utilisant la méthode *DoE*, c'est une façon de simuler la caractéristique $I_{bus}(V_{bus})$ sous la variation simultanée de l'irradiation solaire et de la température du module affectant en effet le courant et la tension de module PV, et par la suite le courant et la tension de bus continu. Dans un premier temps, on maintient l'irradiation solaire constante pour différentes valeurs de température de surface, puis on répète l'opération pour d'autre valeur d'irradiation solaire et on mesure séparément le courant et la tension du module PV, le courant de bus, la tension de bus et la puissance de bus.

IV.3. Caractérisation et expérimentation

La procédure expérimentale est basée sur la mesure des courants et tensions sur le bus continu HVDC, en fonction de l'irradiation solaire et de la température de surface de modules PV de technologies différentes : multicristallin et monocristallin.

Le banc d'essai utilisé pour réaliser ce travail de thèse est installé au Laboratoire Matériaux Optiques, Photoniques et Systèmes LMOPS, à l'université de Lorraine, France. Le banc d'essai illustré par la figure IV.3 se compose des éléments suivants :

- Un module PV au silicium de technologie multi-cristalline et monocristalline, déposé devant une source lumineuse artificielle DeltaLab (comporte 6 lampes halogènes, chacune à une puissance de 1000W).

- Un étage d'adaptation doté d'un hacheur Boost à Couplage Magnétique (Magnetic Coupling Boost ; MCB) réalisés au laboratoire LMOPS à Thionville [Peti11a, Sawi12], alimenté par une source de tension continu.
- Un oscilloscope pour afficher le rapport cyclique de boost MCB.
- Un bus continu HVDC.
- Une charge qui se présente par une lampe à incandescence de 60 W.
- Des appareils de mesures (voltmètre, ampèremètre et wattmètre).
- Un pyranomètre.
- Un thermomètre infrarouge.

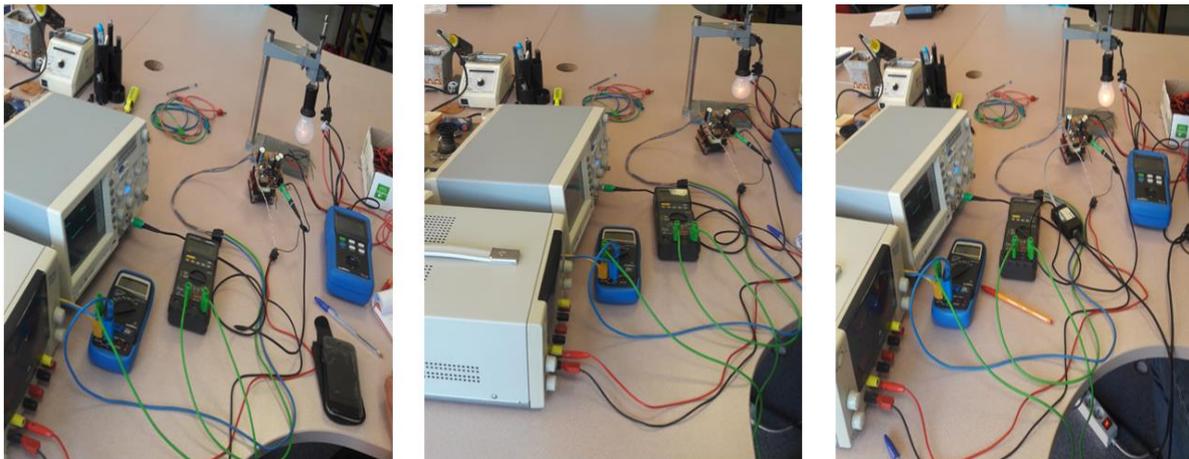


Fig. IV.3. Banc d'essai utilisé pour différentes mesures expérimentales

Le schéma synoptique du montage représentant le banc d'essai de la figure IV.3, utilisé pour la réalisation des expériences de caractérisation du bus continu HVDC par la méthode *DoE*, est donné par le circuit de la figure IV.4 suivant :

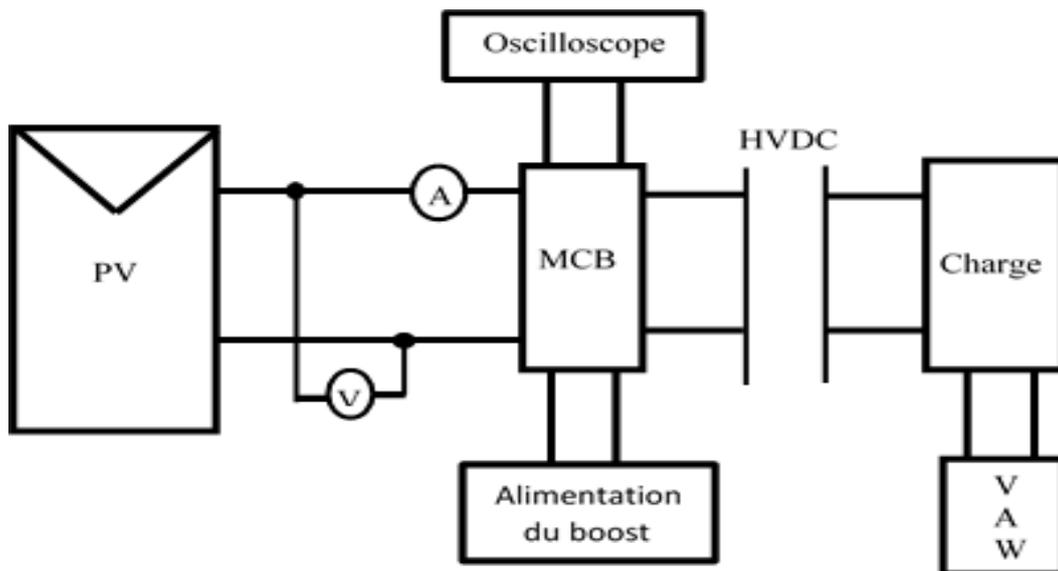


Fig. IV.4. Schéma de principe du circuit d'expérimentation

Le schéma de principe du circuit d'expérimentation donné par la figure IV.4 ci-dessus est utilisé dans un premier temps avec un module PV multi-cristallin et on mesure notre variables d'entrées et de sorties, puis on change le module PV monocristallin et on garde également le même schéma de principe.

Le montage synoptique du circuit de réalisation des essais expérimentaux est constitué de plusieurs éléments cités ci-dessus, différents l'un de l'autre par leurs caractéristiques. Ces caractéristiques sont résumées séparément dans un tableau décrit ci-après.

Les caractéristiques de différents éléments constituant le banc d'essais sont résumées dans le tableau 4.1 suivant :

Table 4.1. Éléments et caractéristiques du banc d'essai

N°	Éléments	Caractéristiques	Objectifs
01	Panneau PS040PR	$P_c = 40W, V_{mp} = 17V,$ $I_{mp} = 2.5A$	Monocristallin
	Panneau BP Solar50	$P_c = 40W, V_{mp} = 17,5V,$ $I_{mp} = 2.9A$	Multi-cristallin
02	Boost MCB	- 12V, MPPT Hill Climbing, - Mesure toutes les 25ms (quatre échantillon à la seconde) - actualisation du rapport cyclique tous les 256ms - Correction du rapport cyclique par pas de 1.1%.	Fabriqué au laboratoire LMOPS à Thionville.
03	Source lumineuse artificielle Deltalab	- P : 6000W, V : 220/380 V, 10A/phase, type ET 404	Lampe halogène
04	Source de tension continue	Marque : FI 630 DS - 2*30 V- 3A - 1*5V- 5A	Alimentation du Boost MCB
05	Oscilloscope numérique	Marque : FI 3202, 200 MHz, 1G Ech/s	Afficher le rapport cyclique du Boost MCB
06	Charge continue	Lampe à incandescence de 60 W	Indique toute variation par allumage/arrêt
07	Appareils de mesures numériques	Voltmètre : Metrix MX 22 Ampèremètre : Metrix MX 55 Multimètre : PX 120	Tension de module PV Courant de module PV Tension de bus, courant de bus et puissance de bus
08	Bus continu HVDC	Transport de tension allant de 200 V à 1KV	Transporter l'énergie électrique du Boost MCB à la charge
09	Pyranomètre	Marque : CMP10 - Sensibilité: $S = 10,33 \mu V / W/m^2$	Mesure l'irradiation solaire du module PV
10	Thermomètre infrarouge	Marque : Raytek ; Raynger ST	Mesure la température de surface de module PV

Notre aspect expérimental est d'utiliser la technique *DoE* pour caractériser et modéliser la caractéristique comportementale du bus continu HVDC, tout en variant simultanément les variables d'entrées ou facteurs :

- l'irradiation solaire est mesurée en variant la distance entre la source lumineuse artificielle et le module PV,
- la température de surface de chacun des modules PV, mesurée au milieu du module PV
- le courant de module PV à l'entrée du boost MCB,
- la tension de module PV à l'entrée du boost MCB,

Et en mesurant les variables de sorties ou réponses du système qui sont :

- le courant de de sortie du boost MCB circulant dans la charge à travers un bus HVDC (courant de bus I_{bus}),
- la tension de sortie du boost MCB, circulant dans la charge à travers le bus HVDC (tension de bus V_{bus}),
- La puissance PPM du bus continu.

Notre travail est basé sur le prélèvement des valeurs des variables d'entrées où facteurs et variables de sorties où réponses, ces valeurs ont été introduit dans un script qui sert à avoir un modèle prédictif de la réponse désirée donc d'avoir des valeurs de la réponse calculées. Tout au long de cette partie, pendant le prélèvement des mesures expérimentales, on maintien la charge continue fixe à 60 W, et le rapport cyclique variable, avec un pas de 1,1%.

Les résultats de ce travail ont été élaborés grâce à un programme développé sous l'environnement MATLAB, qui subdivise en trois grandes parties :

Partie 1 : c'est la partie d'acquisition et de lecture de données expérimentales, on a déterminé les facteurs qui peuvent modifier les réponses, les réponses du système choisies pour atteindre l'objectif. Les valeurs mesurées sont récupérées depuis un fichier Excel, ensuite un choix du plan d'expérience est fait qui définir le domaine d'étude. Facilitant les procédés de calcul par l'utilisation des valeurs centrées réduites des variables d'entrées où facteurs qui sont l'irradiation solaire et la température de surface de module PV, afin de construire la matrice d'expérience utilisée dans la partie ci-dessous.

Partie 2 : c'est la partie d'analyse statistique et de calcul algébrique, présente la partie la plus intéressante de ce script, une analyse de variance ANOVA est nécessaire pour estimer les coefficients du modèle mathématique de la réponse, les effets des facteurs significatifs et les effets d'interactions entre facteurs, et ceux pour les trois réponses désirées : la tension de bus, le courant de bus ou la puissance de bus. Ensuite, après avoir ces coefficients, on aura la possibilité d'évaluer les réponses simulées afin de les comparées avec celles obtenues expérimentalement. Cette partie dotée d'un calcul d'erreur entre les valeurs calculées et les valeurs mesurées ainsi qu'un calcul de coefficient de détermination servant de qualité d'ajustement du modèle.

Partie 3 : c'est la partie de visualisation et de graphisme des résultats de calculs, une analyse graphique est présente, aidant à l'interprétation des résultats. Deux types de graphiques sont

utilisés : des tracés des effets moyens, des effets d'interactions et les courbes de contours en deux dimensions (2D) et des tracés de surface de réponses en trois dimensions (3D), servant à expliquer rapidement les résultats obtenus. Des tables expriment les résultats sont insérés. L'exploitation du banc d'essais installé, nous amène à relever les mesures des points expérimentaux nécessaires à la modélisation et à la caractérisation des réponses du système. Ces valeurs ont été reportées dans des tableaux.

Le tableau 4.2 résume les données expérimentales et les réponses mesurées pour le module PV de technologie multi-cristalline comme suit :

Table 4.2. Données expérimentales et réponses observées du module PV multi-cristallin

N°	Facteurs			Réponses				
	I_r (mV)	T (°C)	I_{pv} (V)	V_{pv} (V)	P_{pv} (W)	I_{bus} (V)	V_{bus} (V)	P_{bus} (W)
01	6,1	29,2	0,801	16,65	13,34	0,152	97,5	16,2
02	6,1	37,6	0,843	16,49	13,90	0,159	83,3	13,1
03	6,1	41,1	0,867	16,38	14,20	0,167	80,6	12,5
04	9,9	30,3	0,956	16,20	15,49	0,168	98,5	16,9
05	9,9	37,2	1,002	16,61	16,64	0,168	97,5	16,5
06	9,9	38,3	1,047	16,45	17,22	0,169	93,6	16,3
07	9,9	40,6	1,074	16,40	17,61	0,170	91,4	16,1
08	13,8	30,2	1,109	16,34	18,12	0,186	124,6	23,5
09	13,8	40,2	1,116	16,29	18,18	0,188	123,7	23,2
10	13,8	45,2	1,202	16,34	19,64	0,191	123,3	23,3
11	18,3	30,6	1,213	16,18	19,63	0,189	137,3	27,4
12	18,3	42,3	1,236	16,03	19,81	0,191	133,2	26,2
13	18,3	45,1	1,243	16,08	19,99	0,198	121,9	22,7

Le tableau 4.3 résume les données expérimentales et les réponses mesurées pour le module PV de technologie monocristalline comme suit :

Table 4.3. Données expérimentales et réponses observées du module monocristallin

N°	Facteurs			Réponses				
	I_r (mV)	T (°C)	I_{pv} (V)	V_{pv} (V)	P_{pv} (W)	I_{bus} (V)	V_{bus} (V)	P_{bus} (W)
01	5,9	30,3	0,670	17,19	11,52	0,134	89,3	14,2
02	5,9	33,8	0,762	17,07	13,01	0,145	80,8	12,3
03	5,9	40,1	0,888	17,15	15,23	0,159	73,7	10,7
04	9,5	36,3	0,894	17,12	15,31	0,164	99,6	16,6
05	9,5	37,5	0,997	17,02	16,97	0,168	94,8	15,6
06	9,5	38,6	1,069	17	18,17	0,170	92,4	14,6
07	9,5	40,1	1,129	16,73	18,89	0,171	90,6	13,7
08	13,1	31,8	1,133	16,85	19,09	0,173	107,3	18,6
09	13,1	38,6	1,174	16,65	19,55	0,175	104,5	18,2
10	13,1	44,7	1,181	16,57	19,57	0,177	103,8	17,6
11	17,7	30,6	1,266	16,72	21,17	0,184	122,1	22,8
12	17,7	37,3	1,274	16,36	20,84	0,187	119	21,8
13	17,7	45,2	1,293	16,2	20,95	0,202	108,6	18,8

IV.4. Modélisation mathématique du bus continu HVDC

Dans ce chapitre, nous présentons une modélisation du comportement de la réponse désirée d'un bus continu HVDC photovoltaïque alimenté par module PV de technologies différentes par la méthode *DoE* sous l'influence simultanée de l'irradiation solaire et de la température de la surface. Comme déjà décrit dans le chapitre précédent, il y a deux technique servant à expliquer la dépendance de la réponse aux facteurs et leur variation vis-à-vis à la direction de variation des facteurs et de leurs amplitude.

IV.4.1. Modèle de régression simple

La régression simple permet de prédire un modèle mathématique de la réponse en fonction des facteurs influençant cette réponse, il se présente par une équation polynomiale dépend des facteurs et leurs interaction, constituant un plan factoriel complet.

La figure IV.5 illustre un exemple d'un plan factoriel complet de la réponse tension de bus continu en fonction de l'irradiation solaire et de la température de surface. Ce plan est déterminé par quatre points expérimentaux comme le montre la figure IV.5 suivante :

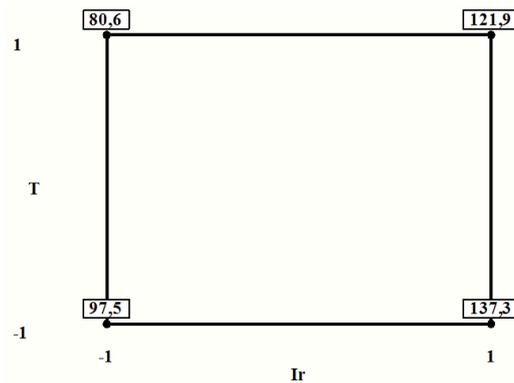


Fig. IV.5. Plan factoriel de la réponse tension de bus

Le modèle de ce plan est défini par les effets des deux facteurs et leurs interaction. Les expériences réalisées de ce modèle ainsi que les réponses choisies correspondantes sont mentionnés dans le tableau 4 et 5 concernant les deux modules PV multi-cristallin et monocristallin respectivement. Ensuite, il est maintenant possible d'obtenir le système de coordonnées centrées réduites (CCR) des deux facteurs I_r et T comme indiqué dans le tableau 4.4 et 4.5 suivants :

Table 4.4. Données expérimentales du modèle de régression simple du module PV multi-cristallin

I_r (mV)	T (°C)	I_r (CCR)	T (CCR)	P_{bus} (W)	I_{bus} (A)	V_{bus} (V)
5,9	29,2	-1	-1	16,2	0,152	97,5
5,9	41,1	-1	0,4969	12,5	0,167	80,6
18,3	30,6	1	-0,8239	27,4	0,189	137,3
18,3	45,1	1	1	22,7	0,198	121,9

Table 4.5. Données expérimentales du modèle de régression simple du module PV monocristallin

I_r (mV)	T (°C)	I_r (CCR)	T (CCR)	P_{bus} (W)	I_{bus} (A)	V_{bus} (V)
6,1	30,3	-1	-1	14,2	0,134	89,3
6,1	40,1	-1	0,5256	10,7	0,159	73,7
17,7	32,5	1	-0,8974	22,8	0,184	122,1
17,7	45,2	1	1	18,8	0,202	108,6

Après avoir déterminé l'objectif de l'étude, on a choisi le plan d'expérience convenable, ensuite on a opté pour réaliser les expériences déjà sélectionnée au début de l'étude. Une simulation et modélisation du processus expérimentale est faite. En tenant compte du modèle polynomial servant de modèle de régression simple pour remplacer les valeurs des effets des facteurs et de leurs interactions afin d'obtenir un système d'équations à résoudre. La méthode *DoE* nécessite l'utilisation de la technique de régression pour permettre la détermination des coefficients d'un modèle.

IV.4.2. Modèle de régression multiple

La réponse est modélisé par un modèle d'ordre supérieure à un, une équation polynomiale peut présenter cette réponse, elle prend en considération les effets des facteurs, leurs interaction et les termes quadratiques des effets.

Le plan d'expérience utilisé pour prédire le modèle de régression est un plan composite centré (Composite Central Design CCD), qui se détermine par dix essais expérimentaux, sont les essais de 01 à 10 tirés des tableaux 2 et 3 respectivement.

En première étape, un calcul des valeurs centrées réduites est faite, ensuite doit être remplacer dans l'équation polynomiale pour aboutir aux systèmes d'équations, qui sera résoudre afin d'obtenir les coefficients du modèle.

IV.5. Résultats et interprétation

Les résultats de simulation obtenus servant, de modéliser et de caractériser le bus continu HVDC, sont donnés sous forme d'une analyse statistique soit : une analyse de variance ANOVA où une analyse graphique. Les analyses statistiques permettent d'évaluer la qualité du modèle prédictif, sa validation et la significativité des coefficients.

IV.5.1. Analyse statistique de la technique de criblage

La mise en œuvre des analyses statistiques doit permettre aux expérimentateurs de porter un jugement sur les résultats obtenus :

- Un modèle décrivant les variations de la réponse dans le domaine expérimental en fonction de la variation des facteurs,

- Des estimations des coefficients associés aux différents facteurs du modèle,
- Des résidus traduisant les écarts entre les valeurs mesurées et celles calculées.

Dans le but de mesurer la précision du modèle prédictif de régression de la réponse, on a considéré les trois paramètres de validation : le coefficient de corrélation multiple ajusté où de détermination R^2 , l'erreur relative E_r et l'erreur quadratique moyenne $RMSE$ (Root Mean Square Error). Dans ce qui suit, en utilisant les notations suivantes :

- A pour facteur irradiation solaire,
- B pour facteur température de la surface,
- AB pour l'interaction entre les facteurs A et B,
- AA pour facteur irradiation solaire au carré,
- BB pour facteur température de surface au carré.

Deux cas ont été étudiés dans cette thèse, le premier cas est le raccordement de l'entrée du système à un module PV multi-cristallin, et le deuxième à un module PV monocristallin.

IV.5.1.1. Tension de bus

La tension de bus constituée un paramètre prépondérant dans un système de production d'énergie électrique d'origine photovoltaïque alimentant une charge continue ou même injectée au réseau de distribution, c'est une des réponses les plus utiles pour l'alimentation d'une charge continue. Il est à noter que dans les systèmes de production d'énergie électriques d'origine renouvelable, il est souvent demandé une source d'énergie électrique distribuée sur un bus ayant un niveau de tension constant que ce bus soit continu (DC) ou alternatif (AC). Lorsque l'on veut extraire le maximum de puissance disponible par un suivi du MPP, le boost qui assure cette fonction est généralement associé à un système de stockage assurant la tension du bus à une valeur prédéfinie. Dans notre étude et pour mettre en évidence le comportement du bus alimenté par une source photovoltaïque seule, nous avons modélisé par la méthode DoE le générateur photovoltaïque sans la partie stockage. Ceci permet en effet de mettre en évidence le comportement général du bus HVDC en ne considérant que l'effet photovoltaïque de la source.

Grâce toujours à la théorie des plans d'expériences, nous avons eu la possibilité d'étudier, d'évaluer et de prédire un modèle mathématique représentant la tension de bus, et par ailleurs estimer les coefficients décrivant ce modèle, ainsi que la contribution de chaque facteur au modèle prédit de la réponse tension de bus. Une ANOVA permettant une évaluation du modèle prédictif de régression, qui présente au moins sa dépendance à un facteur. Les résultats obtenus sont résumés par trois tableaux représentatifs possédant chacun des tests statistiques, afin de mieux expliquer le comportement de la réponse sous la variation des facteurs intervenant dans ce modèle.

Le tableau 4.6 présente le test des effets des paramètres du modèle prédictif de la réponse tension de bus ainsi que la contribution de chacun des facteurs dans ce modèle et ceux pour les deux cas étudiés des deux modules PV suivants :

Table 4.6. Test des effets des paramètres de la tension de bus

	Source	Degré de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F Ratio	Contribution (%)
Multi-cristallin	A : Ir	1	1644,3025	1644,3025	40600,06	86,283
	B : T	1	260,8225	260,8225	6440,062	13,686
	AB : Ir*T	1	0,5625	0,5625	13,8889	0,029
Mono-cristallin	A : Ir	1	1145,8225	1145,8225	1037,413	84,336
	B : T	1	211,7025	211,7025	191,6727	15,582
	AB : Ir*T	1	1,1025	1,1025	0,9982	0,081

A partir du tableau 4.6, il est clair de tirer une information sur la contribution de chaque coefficient au modèle de régression prédictif de la réponse, dont la plus grande contribution est affectée au facteur A (irradiation solaire) avec 86 % pour le système alimenté par un module PV multi-cristallin, contre environ 14 % pour le facteur B (température de surface) et 0,02 % pour le facteur AB (interaction). En effet, le même ordre de contribution est remarqué par le remplacement du module multi-cristallin par le module monocristallin. On constate que le facteur l'irradiation solaire est plus significatif et qui influence considérablement sur la tension de bus, suivi par la température de surface du module qui alimente notre système.

Une analyse de variance est nécessaire pour permettre de détecter la dépendance du modèle au facteur. Elle offre la possibilité de juger le processus global et le modèle prédit respectivement, tandis que l'erreur est minimale, le modèle ajuste mieux les données expérimentales. La probabilité du modèle de régression aussi présente une valeur qui ne dépasse pas la valeur critique de 5% ($\alpha = 0,05$) pour les deux cas comme donné par le tableau 4.7 suivant :

Table 4.7. Table d'ANOVA du modèle de la tension de bus

	Source	Degré de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F Ratio	Probabilité
Multi-cristallin	Modèle	3	1905,6875	635,229	15684,67	0,0059*
	Erreur	1	0,0405	0,041		
	Total	4	1905,7280			
Mono-cristallin	Modèle	3	1358,6275	452,876	410,0279	0,0363*
	Erreur	1	1,1045	1,104		
	Total	4	1359,7320			

Après avoir choisi le plan de criblage servant à estimer la réponse, un codage des valeurs des niveaux de facteurs est nécessaire (comme mentionnés dans les tableaux 4.4 et 4.5), ensuite on remplace ces valeurs codées dans l'équation polynomiale d'ordre simple déjà décrit dans le chapitre précédent, un système d'équations est établi, permettant le calcul des coefficients du

modèle de régression. Ces coefficients doivent être restitués dans le système d'équations afin d'estimer les réponses calculées.

Les coefficients obtenus du modèle de régression de la réponse tension de bus, sont donnés par le tableau 4.8 ci-dessous, on observe que le facteur irradiation solaire possède une valeur importante que la température de surface de module PV. Tout facteur possède une étoile (*) présente une probabilité inférieure à la valeur de $\alpha = 0,05$, est considéré comme significatif et sera contribuer au modèle prédit de la réponse.

La tension de bus est variée dans la même direction que l'irradiation solaire et avec une grande amplitude, et dans une direction inverse à la température de surface et avec une amplitude moindre et ceux pour les deux cas. On remarque que les deux modules agissent de la même façon sur la réponse tension de bus.

Table 4.8. Estimation des paramètres du modèle de la régression de la tension de bus

	Terme	Coefficients	Erreur Standard	T_Student	Probabilité
Multi-cristallin	Intercepte	109,28	0,09	1214,2	0,0005*
	A : Ir	20,275	0,100623	201,49	0,0032*
	B : T	-8,075	0,100623	-80,25	0,0079*
	AB : Ir*T	0,375	0,100623	3,73	0,1669
Mono-cristallin	Intercepte	98,66	0,47	209,91	0,0030*
	A : Ir	16,925	0,525476	32,21	0,0198*
	B : T	-7,275	0,525476	-13,84	0,0459*
	AB : Ir*T	0,525	0,525476	1,00	0,5003

On peut tirer de ce tableau le modèle prédictif de la réponse tension de bus, en éliminant les facteurs non significatifs (ceux qui ne porte pas d'étoile), ce qui rend le modèle plus précis, et mieux explique les données expérimentales.

Les modèles prédictifs résultants après le remplacement des coefficients tirés du tableau 4.8 pour les deux cas sont donnés par les équations IV.1 et IV.2 suivants :

$$V_{bus_multi} = 109,28 + 20,275x_1 - 8,075x_2 \quad (IV.1)$$

$$V_{bus_mono} = 98,66 + 16,925x_1 - 7,275x_2 \quad (IV.2)$$

Ces modèles prédictifs servant de calculs de la réponse tension de bus estimée. A partir de l'équation IV.1 et IV.2 et au vu des signes des coefficients propres aux facteurs, on observe la présence d'une relation positive entre la tension de bus et l'irradiation solaire contrairement à la température de surface qui présente une relation négative. Aussi, il est clair que le coefficient d'irradiation solaire possède une valeur supérieure à la valeur de la température de surface à environ le double.

IV.5.1.2. Courant de bus

N'est pas moins important que la tension de bus, le courant de bus constitué une variable de sortie assez nécessaire pour caractériser le comportement de bus continu photovoltaïque sous la variation simultanée des variables d'entrées sélectionnées par l'expérimentateur choisissant une conception par les plans d'expériences. Comme vu et trouver pour la tension de bus continu, on généralise la méthode *DoE* pour avoir un modèle prédictif de la réponse courant de bus continu.

Un plan de criblage décrit avec les points expérimentaux donnés par le tableau 4.4 et 4.5 ci-dessus, mène à estimer et évaluer le modèle de régression du courant de bus continu. Le résultat obtenu est résumé dans le tableau 4.9 suivant :

Table 4.9. Test des effets des paramètres du courant de bus

	Source	Degré de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F Ratio	Contribution (%)
Multi-cristallin	A : Ir	1	0,00105625	0,00105625	21125,00	85,129
	B : T	1	0,00018225	0,00018225	3645,000	14,688
	AB : Ir*T	1	0,00000225	0,00000225	45,0000	0,181
Mono-cristallin	A : Ir	1	0,00216225	0,00216225	882,5510	82,004
	B : T	1	0,00046225	0,00046225	188,6735	17,531
	AB : Ir*T	1	0,00001225	0,00001225	5,0000	0,464

Il est à noter que la contribution de facteur irradiation solaire dans le modèle de régression du courant de bus continu est toujours remarquable et supérieure avec plus de 80 % pour les deux cas (module multi-cristallin, module monocristallin) contre seulement environ 15% à la contribution de la température de surface, et avec une contribution de l'interaction assez faible.

Le tableau 4.10 décrit une analyse de variance du processus global, expliqué par le modèle de régression et l'erreur correspondante. La faible valeur de l'erreur dans les deux cas, montre le bon ajustement par le modèle prédit. Une probabilité de valeur inférieure à la valeur critique de 0,05, rendre le modèle précis et accepté, qui dépend des facteurs entrant en jeux dans ce modèle.

Un modèle de régression simple est déterminé par une équation polynomiale à quatre coefficients. En effet, ces coefficients sont obtenus en utilisant un logiciel de calcul statistique. Tout coefficient doit être significatif ou non, selon leur $T_{Student}$, ce qui confirmé par la probabilité de chaque facteur. La probabilité critique est la probabilité pour laquelle le test statistique de l'hypothèse est rejeté ou non.

Table 4.10. Table d'ANOVA du modèle du courant de bus

	Source	Degré de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F Ratio	Probabilité
Multi-cristallin	Modèle	3	0,00124075	0,000414	8271,667	0,0081*
	Erreur	1	0,00000005	0,00000005		
	Total	4	0,00124080			
Mono-cristallin	Modèle	3	0,00263675	0,000879	358,7415	0,0388*
	Erreur	1	0,00000245	0,00000245		
	Total	4	0,00263920			

Chaque valeur de probabilité inférieure à la valeur de probabilité critique est affirmée par une étoile (*) à droite du coefficient dans le tableau 4.11 d'estimation des paramètres du modèles prédit.

Table 4.11. Estimation des paramètres du modèle de la régression du courant de bus

	Terme	Coefficients	Erreur Standard	T_Student	Probabilité
Multi-cristallin	Intercepte	0,1758	0,0001	1758,0	0,0004*
	A : Ir	0,01625	0,000112	145,34	0,0044*
	B : T	0,00675	0,000112	60,37	0,0105*
	AB : Ir*T	-0,00075	0,000112	-6,71	0,0942
Mono-cristallin	Intercepte	0,1694	0,0007	242,00	0,0026*
	A : Ir	0,02325	0,000783	29,71	0,0214*
	B : T	0,01075	0,000783	13,74	0,0463*
	AB : Ir*T	-0,00175	0,000783	-2,24	0,2677

Les coefficients possédant une valeur de probabilité expliquée par une étoile est considéré comme influent et participe au modèle de régression, le modèle prédit de la réponse courant de bus continu est donné par la formule suivante :

$$I_{bus_multi} = 0,1758 + 0,01625x_1 + 0,00675x_2 \quad (IV.3)$$

$$I_{bus_mono} = 0,1694 + 0,02325x_1 + 0,01075x_2 \quad (IV.4)$$

Le courant de bus donné par les équations IV.3 et IV.4 obtenus après modélisation pour les deux modules PV. Suite aux valeurs des coefficients correspondant aux facteurs significatifs du modèle prédit du courant de bus, qui présentent un signe positif, cela est expliqué par la variation du courant de bus dans la même direction de l'irradiation solaire et de la température de surface.

IV.5.1.3. Puissance de bus

Trois réponses importantes désirées qui ne se séparent jamais ; tension, courant et puissance, sont sélectionnées par l'expérimentateur afin d'atteindre d'objectif de l'étude. Dans ce qui suit, un test statistique muni d'une analyse d'ANOVA est appliqué pour évaluer et modéliser la réponse puissance de bus continu HVDC. Les trois tableaux suivants expriment ces tests statistiques, possède chacun des informations pouvant expliquer mieux les résultats obtenus. Le test des effets des facteurs mentionné par le tableau 4.12, nous renseigne sur la contribution de chaque effet de facteur dans le modèle de régression régi par le plan d'expérience choisi. Le comportement décrit pour cette réponse ne diffère pas sur les deux réponses précédentes, où l'effet du facteur irradiation solaire domine les autres effets avec un pourcentage de 86% pour un module multi-cristallin et 83% pour un module monocristallin respectivement contre l'effet de la température de surface avec une contribution de 13% et 16% pour les deux modules distinctes.

Table 4.12. Test des effets des paramètres de la puissance de bus

	Source	Degré de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F Ratio	Contribution (%)
Multi-cristallin	A : Ir	1	114,49000	114,49000	1590,139	86,485
	B : T	1	17,64000	17,64000	245,0000	13,325
	AB : Ir*T	1	0,25000	0,25000	3,4722	0,188
Mono-cristallin	A : Ir	1	69,722500	69,722500	139445,0	83,153
	B : T	1	14,062500	14,062500	28125,00	16,771
	AB : Ir*T	1	0,062500	0,062500	125,0000	0,074

L'analyse de variance donnée par le tableau 4.13 est aussi présente pour établir une description totale du modèle prédit et leur erreur. Un modèle de régression est évalué par sa valeur de probabilité qui se situe au-dessous de la valeur critique de rejet de l'hypothèse, elle est de l'ordre de 5%, une erreur est assez petite, rendre le modèle accepté dans les deux cas de l'étude.

Table 4.13. Table d'ANOVA du modèle de la puissance de bus

	Source	Degré de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F Ratio	Probabilité
Multi-cristallin	Modèle	3	132,38000	44,1267	612,8704	0,0297*
	Erreur	1	0,07200	0,0720		
	Total	4	132,45200			
Mono-cristallin	Modèle	3	83,847500	27,9492	55898,33	0,0031*
	Erreur	1	0,000500	0,0005		
	Total	4	83,848000			

Toute analyse statistique est dotée d'une estimation des coefficients du modèle prédictif de la réponse désirée, ce qui est résumé par le tableau 4.14. Ce tableau donne plusieurs informations nécessaires pour décrire le modèle de régression et porter aussi des informations sur les effets pertinents influençant sur la variation de la réponse.

Quatre coefficients estimés qui entrent en jeu dans le modèle de régression, dont trois présentent un effet significatif. Un test de student (T_Student) présente la valeur de la statistique de test de l'hypothèse pour laquelle on rejette ou non le coefficient. Les coefficients qui possèdent une probabilité inférieure à la valeur de $\alpha = 0,05$ et qui sont marqués par une étoile (*) sont significatifs et possèdent un effet non négligeable sur la réponse.

Table 4.14. Estimation des paramètres du modèle de la régression de la puissance de bus

	Terme	Coefficients	Erreur Standard	T_Student	Probabilité
Multi-cristallin	Intercepte	19,64	0,12	163,67	0,0039*
	A : Ir	5,35	0,134164	39,88	0,0160*
	B : T	-2,1	0,134164	-15,65	0,0406*
	AB : Ir*T	-0,25	0,134164	-1,86	0,3136
Mono-cristallin	Intercepte	16,62	0,01	1662,0	0,0004*
	A : Ir	4,175	0,01118	373,42	0,0017*
	B : T	-1,875	0,01118	-167,7	0,0038*
	AB : Ir*T	-0,125	0,01118	-11,18	0,0568

A partir de ces estimations, on peut prédire et écrire l'équation du modèle de régression de la puissance de bus comme donné par les équations IV.5 et IV.6 suivantes :

$$P_{bus_multi} = 19,64 + 5,35x_1 - 2,1x_2 \quad (IV.5)$$

$$P_{bus_mono} = 16,62 + 4,75x_1 - 1,875x_2 \quad (IV.6)$$

Le tableau 4.15 est un tableau récapitulatif résumant les estimations de coefficient de corrélation multiple et de l'erreur quadratique moyenne des trois réponses du système : tension de bus, courant de bus et puissance de bus, et ceux pour les deux modules PV distinctes.

Table 4.15. Estimation de coefficient de corrélation multiple et l'erreur quadratique moyenne du modèle de régression simple

	R^2_{adj}		RMSE	
	Multi-cristallin	Monocristallin	Multi-cristallin	Monocristallin
V_{bus}	0,999915	0,996751	0,201246	1,050952
I_{bus}	0,999839	0,996287	0,000224	0,001565
P_{bus}	0,997826	0,999976	0,268328	0,022361

IV.5.2. Analyse graphique de la technique de criblage

Tout ce qui a été donné par l'analyse statistique faite auparavant, peut être traduit graphiquement par l'analyse graphique. L'analyse graphique est aussi un outil aidant à l'interprétation des résultats, ils permettent également de tirer plus rapidement des conclusions. Elle se décompose d'une analyse graphique des effets de facteurs et leurs interactions.

IV.5.2.1. Effets moyens des réponses du module PV multi-cristallin

A partir de la figure IV.6, on observe que lorsque l'irradiation solaire passe de niveau -1 qui correspond à une valeur de l'irradiation solaire de 571 W/m^2 au niveau 0 qui correspond à la valeur 939 W/m^2 , la tension de bus continu passe donc de 89 V à $109,28 \text{ V}$ avec une augmentation d'environ $20,3 \text{ V}$, cela présente l'effet moyen de l'irradiation solaire de la réponse tension de bus. Cependant, une fois la température de surface passe de niveau -1 qui correspond à la valeur de $29,2 \text{ }^\circ\text{C}$ au niveau 0 de valeur à $37,2 \text{ }^\circ\text{C}$, la tension de bus passe de $117,3 \text{ V}$ à $109,28 \text{ V}$, donc une diminution de $8,07 \text{ V}$ qui représente ainsi l'effet du facteur B. En effet, l'effet global du facteur A est représenté par le passage de la tension de bus de 89 V à $129,5 \text{ V}$, et l'effet global du facteur B est exprimé par le passage de la tension de bus de $117,3 \text{ V}$ à $101,2 \text{ V}$. La variation de la tension de bus continu HVDC se fait dans la même direction de variation de l'irradiation solaire avec une grande amplitude contrairement au comportement de la tension de bus avec la température de surface, qui se fait dans une direction inverse avec moins d'amplitude de variation.

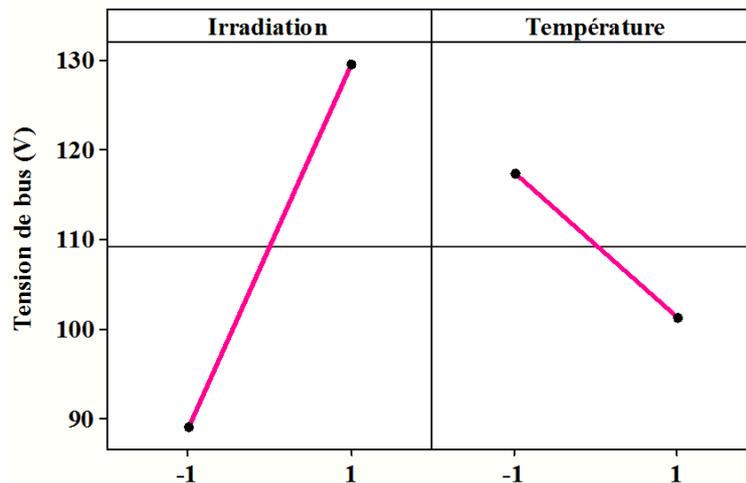


Fig. IV. 6. Effets moyens de la réponse tension de bus

Le courant de bus varié dans la même direction de variation des deux facteurs considérés, mais avec des amplitudes différents comme le montre la figure IV.7. L'effet moyen du facteur irradiation solaire sert à augmenter le courant de bus d'un niveau à un autre respectivement avec une valeur considérable, et la température de surface agit sur la même direction de variation, mais avec un ampleur un peu moins de l'irradiation solaire. Donc, le courant de bus dans son

effet global passe de 0,159 A à 0,192 A pour un passage de l'irradiation solaire de 571 W/m^2 à 1772 W/m^2 , et passe de 0,169 A à 0,182 A pour un passage de la température de surface de $29,2 \text{ }^\circ\text{C}$ à $45,1 \text{ }^\circ\text{C}$.

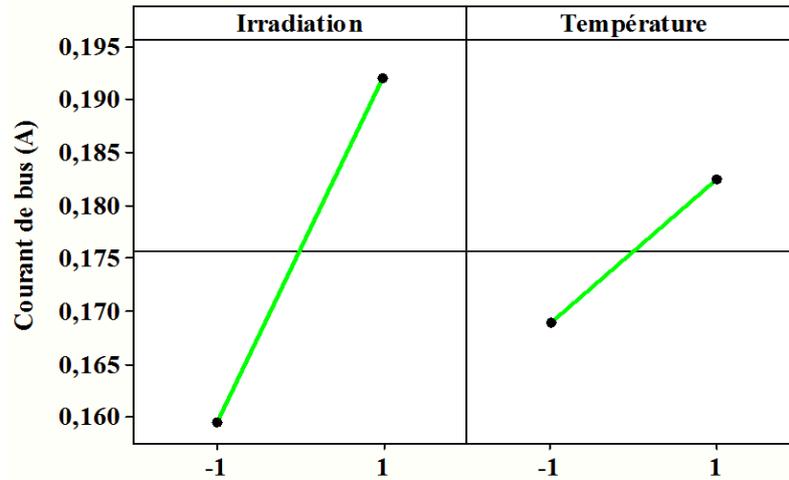


Fig. IV. 7. Effets moyens de la réponse courant de bus

La figure IV.8 montre comment variée la puissance de bus sous la variation simultanée de l'irradiation solaire et la température de surface toujours comme les autres réponses. La puissance de bus possède le même comportement que la tension de bus, en termes de direction et d'ampleur de variation.

L'effet global de la puissance de bus est défini par la différence entre la moyenne des réponses au niveau bas et la moyenne des réponses au niveau du facteur. Cela mène à un passage de la puissance de bus de $14,29 \text{ W}$ à $24,99 \text{ W}$ pour que l'irradiation passe de 571 W/m^2 à 1772 W/m^2 , et passe de $21,74 \text{ W}$ à $17,54 \text{ W}$ pour un passage de la température de surface de $29,2 \text{ }^\circ\text{C}$ à $45,1 \text{ }^\circ\text{C}$. Disant que la puissance de bus variée fortement avec l'irradiation et moins influée par la température.

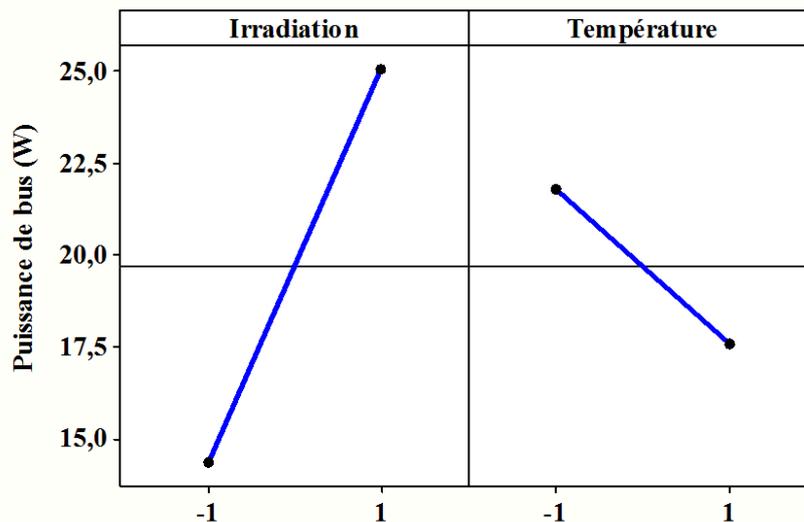


Fig. IV.8. Effets moyens de la réponse puissance de bus

IV.5.2.2. Effets moyens des réponses du module PV monocristallin

De la même façon, on interprète la dépendance de la réponse tension de bus avec les facteurs indépendants de l'irradiation solaire et de la température de la surface, où chaque module PV présente ces propres caractéristiques de tension, de courant et de puissance. Le même comportement est décrit pour évaluer l'effet moyen de la tension de bus comme le montre la figure IV.9, là où la tension de bus dépend considérablement de l'irradiation que de la température mais avec un signe opposé. La tension de bus agrandis et passe de 81,73 V à 115,58 V pour une irradiation qui passe de niveau bas qui vaut 591 W/m^2 au niveau haut qui vaut 1713 W/m^2 , mais abaissée d'un niveau haut qui vaut 105,93 V à un niveau bas de 91,38 V pour une température passant de $30,3 \text{ }^\circ\text{C}$ à $45,2 \text{ }^\circ\text{C}$.

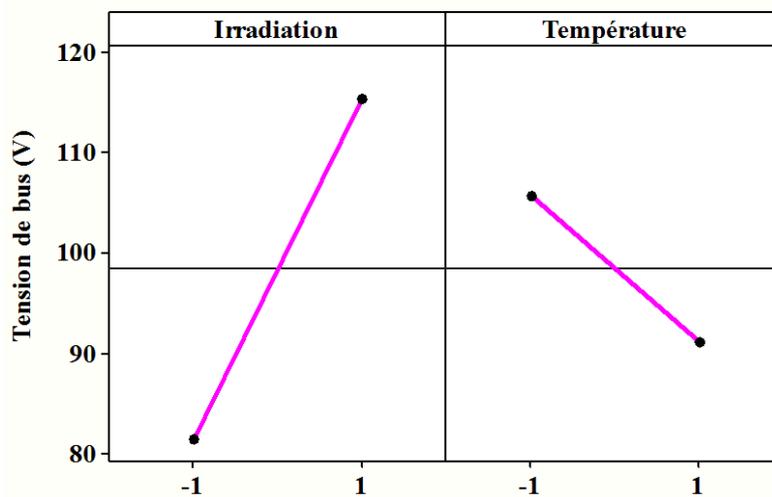


Fig. IV.9. Effet moyen de la réponse tension de bus

Pareil pour le courant de bus comme été identifié pour le module PV multi-cristallin, la différence réside dans l'amplitude de variation, mais reste la direction de variation la même pour la réponse comme illustré par la figure IV.10.

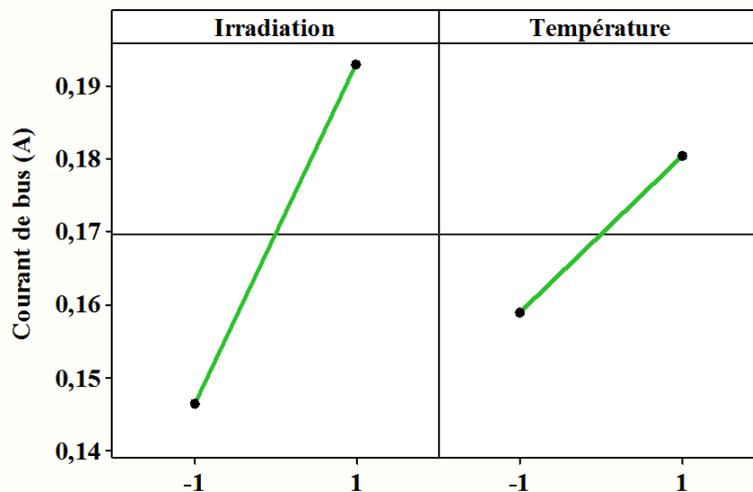


Fig. IV.10. Effet moyen de la réponse courant de bus

L'effet moyen du courant de bus est déterminé quand l'irradiation solaire passe du niveau -1 au niveau 0, ou passe de niveau 0 au niveau +1, cela veut dire que la droite de régression du courant de bus passe de 0,146 A à 0,169 A ou bien passe de 0,169 A à 0,192 A, avec un agrandissement de 0,023. Par ailleurs, le courant de bus subit une légère augmentation quand la température passe d'un niveau bas à un niveau haut, donc, il fait un passage de 0,158 A à 0,169 A avec un agrandissement de 0,01.

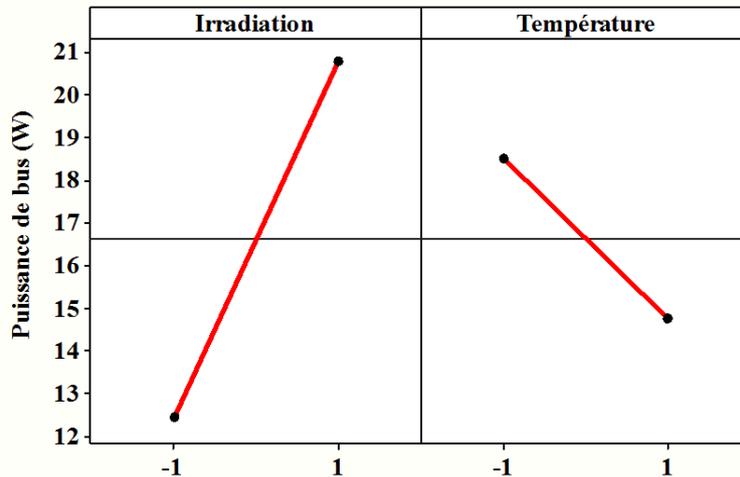


Fig. IV.11. Effet moyen de la réponse puissance de bus

La puissance de bus continu dans le cas d'une alimentation de ce bus par un module PV monocristallin subit le même comportement pour une alimentation de bus par un module PV multi-cristallin, seulement une différence dans les amplitudes de variations, mais reste la direction de variation la même. L'effet global de la puissance de bus est de passer de la moyenne au niveau bas à la moyenne des réponses au niveau haut, elle passe de 12,44 W à 20,79 W pour l'irradiation et passe de 18,49 W à 14,74 W pour la température respectivement.

IV.5.2.3. Effets d'interaction des réponses du module PV mutli-cristallin

L'interaction présente un effet faible en-là comparant avec les autres effets des facteurs sur la variation des réponses choisies, mais elle est négligeable comme illustré par la figure IV.12. L'effet d'interaction est obtenu en fixant le premier facteur à un niveau et on change le niveau de l'autre facteur d'un niveau bas à un niveau haut et vice versa pour le second facteur, on aura une interaction irradiation/température comme dans la figure IV.12 (a) et une interaction température/irradiation comme dans la figure IV.12 (b). Ces deux interactions prennent la même valeur entre les facteurs A et B. L'interaction est de 0,375 pour la réponse tension de bus.

La figure IV.12 (a) signifie que, l'effet de l'irradiation est moins important quand la température augmente. Quand l'irradiation est au niveau bas qui correspond au 591 W/m^2 , l'effet de la température sur la tension de bus est de 8,45 V. Quand l'irradiation est au niveau haut qui correspond au 1307 W/m^2 , l'effet de la température est de 7,7 V. D'autre part, la

figure IV.12 (b) aussi signifie que, l'effet de la température est un peu abaissé quand l'irradiation augmente. Quand la température est au niveau bas qui correspond à $29,2^{\circ}\text{C}$, l'effet de l'irradiation est de $19,9\text{ V}$. Quand la température est au niveau haut qui correspond à $45,1^{\circ}\text{C}$, l'effet de l'irradiation est de $20,65\text{ V}$.

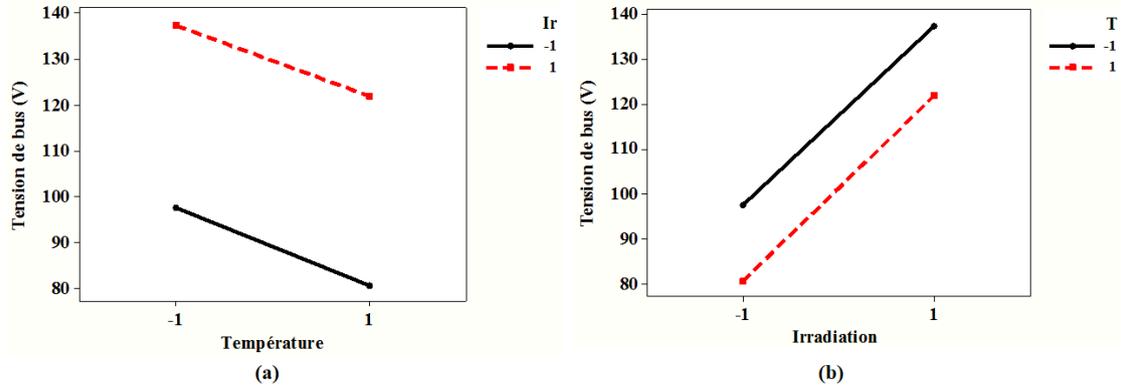


Fig. IV.12. Effet d'interaction de la réponse tension de bus du module PV multi-cristallin, (a) l'interaction irradiation/température et (b) l'interaction température/irradiation

Les effets des interactions de la réponse courant de bus est similaire au tracé des effets moyens des facteurs en terme de direction de variation, mais ici on veut avoir la variation simultanée sur la réponse de la figure IV.13 suivante :

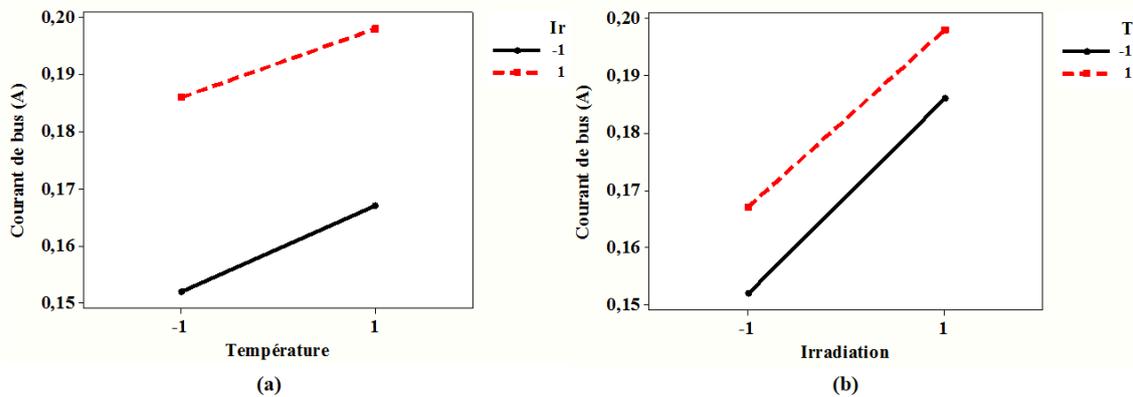


Fig. IV.13. Effet d'interaction de la réponse courant de bus du module PV multi-cristallin, (a) l'interaction irradiation/température et (b) l'interaction température/irradiation

L'interaction est assez faible pour la réponse courant de bus, il présente une faible contribution dans le modèle de régression de la réponse décrit précédemment dans l'analyse statistique, elle est de l'ordre de $-0,00075$. Cette valeur présente la différence de la réponse entre les niveaux bas et haut de la température quand on maintien l'irradiation au niveau bas et on trace la droite de régression, puis et on répète le calcul pour le niveau haut de l'irradiation.

De la figure IV.14, on peut monter qu'elle existe une interaction entre l'irradiation solaire et la température de surface aussi faible comme les autres réponses, et présente un signe négatif par rapport à la réponse.

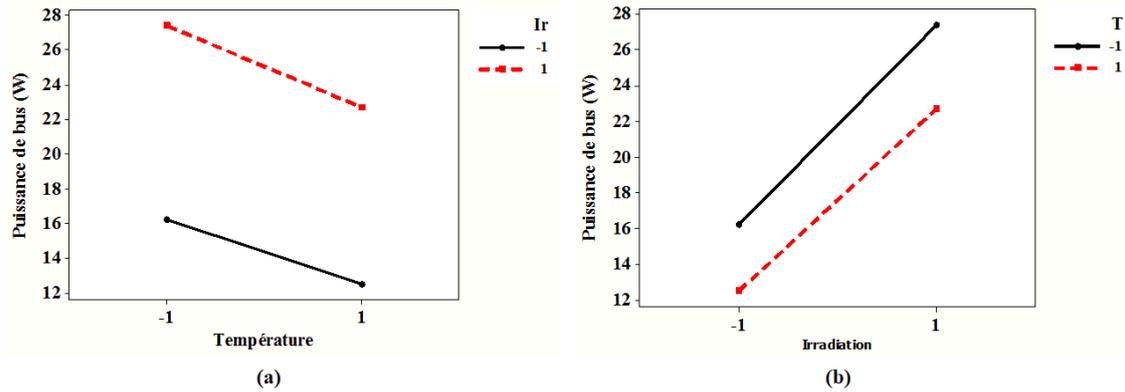


Fig. IV. 14. Effet d’interaction de la réponse puissance de bus du module PV multi-cristallin, (a) l’interaction irradiation/température et (b) l’interaction température/irradiation

L’effet d’interaction de la réponse puissance de bus est égale à $-0,25$, ce qui signifie l’interaction irradiation/température et l’interaction température/irradiation à un effet négligeable sur la variation de la réponse.

IV.5.2.4. Effets d’interaction des réponses du module PV monocristallin

Les effets des interactions des réponses concernant l’alimentation du bus continu par un module PV monocristallin réagissent comme celui pour le module multi-cristallin, une différence réside dans la valeur d’interaction, mais on est toujours dans le même ordre de grandeur. La figure IV.15 présente les effets des interactions de la tension de bus, où les droites sont presque parallèles, mais n’empêche l’existence d’une interaction entre les facteurs.

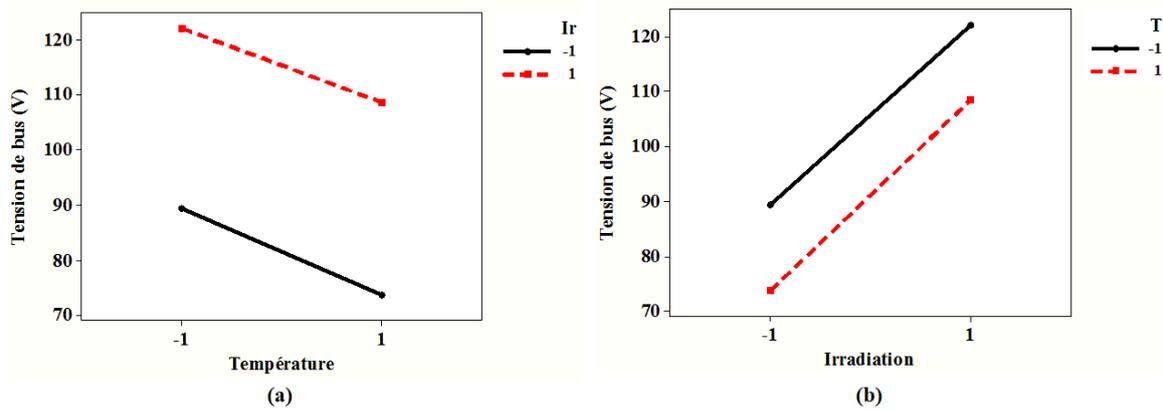


Fig. IV.15. Effet d’interaction de la réponse tension de bus du module PV monocristallin, (a) l’interaction irradiation/température et (b) l’interaction température/irradiation

A partir de la figure IV.16, on détecte un effet d’interaction du courant de bus en fonction de la variation de l’irradiation solaire et de la température de surface, il présente une valeur petite, ce qui signifie la faible contribution de cet effet dans le modèle de régression. L’effet d’interaction à pour valeur de $-0,00175$, les droites des effets sont dans le sens de variation de la réponse courant de bus.

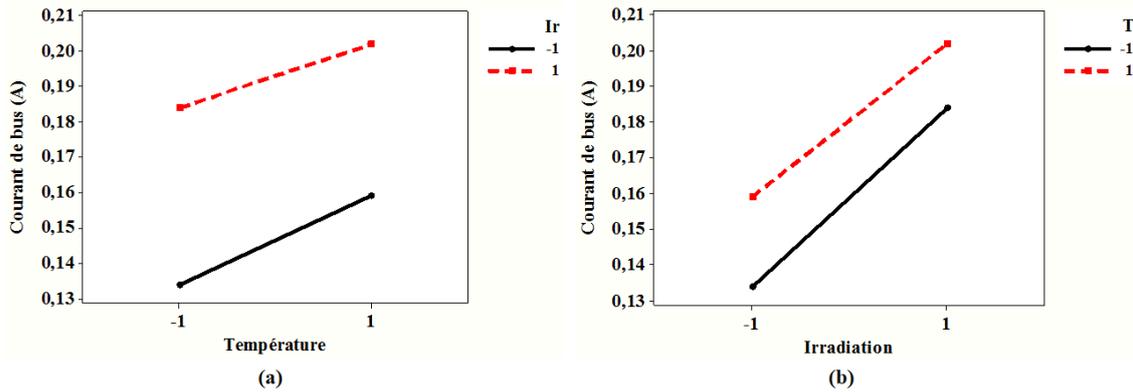


Fig. IV.16. Effet d'interaction de la réponse courant de bus du module PV monocristallin, (a) l'interaction irradiation/température et (b) l'interaction température/irradiation

Comme tous les effets des interactions vus au-dessus, les effets des interactions de la puissance de bus présentent l'ordre et la direction de variation de la réponse sous la variation simultanée des facteurs étudiés.

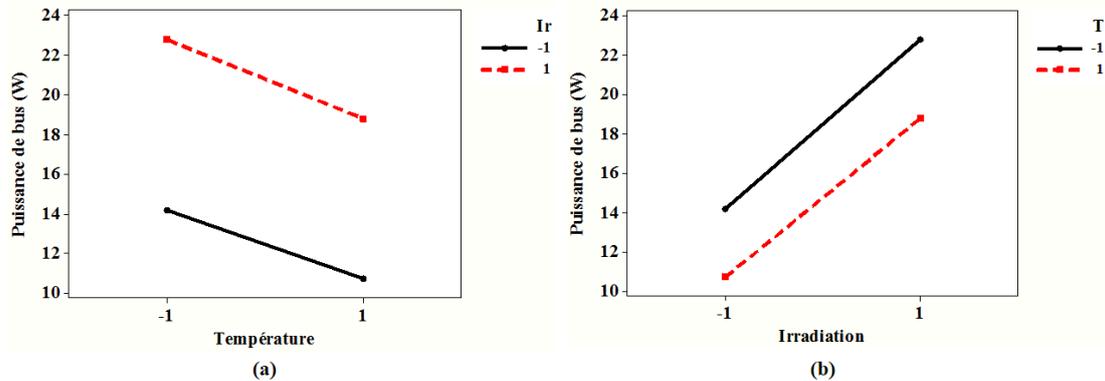


Fig. IV.17. Effet d'interaction de la réponse puissance de bus du module PV monocristallin, (a) l'interaction irradiation/température et (b) l'interaction température/irradiation

La figure IV.17 exprime le mode de variation de la puissance de bus quand on varie le niveau de l'irradiation pour avoir comment varie la réponse sous différents niveaux de température de surface, sur cette figure l'effet d'interaction est égale à $-0,125$.

IV.5.3. Analyse statistique de la technique de surface de réponse

La méthodologie des surfaces de réponses constitue donc le second volet de la méthode des plans d'expériences. Cette technique vise à déterminer d'une façon quantitative les variations de la réponse vis-à-vis des facteurs d'influence significative, on cherche comment varié la réponse, existe-il un optimum dans ce domaine d'étude ? On cherche dans cette étude d'observer les variations d'une ou plusieurs réponses dans un domaine expérimental. Les plans d'expériences pour l'étude des surfaces de réponses sont des dispositifs expérimentaux plus onéreux que ceux destinés à l'étude des effets des facteurs car nécessitant davantage d'essais.

Les étapes à suivre dans ce cas d'étude de surface de réponse sont les mêmes que celles suivies lors d'une étude de criblage. Cependant, leur contenu est différent. En effet, le modèle à établir lors d'une étude de surface de réponse n'a pas la même forme que celui recherché dans une étude de criblage. La méthode des moindres carrés est la méthode utilisée pour faire le calcul, elle sert à minimiser la somme des carrés des résidus.

IV.5.3.1. Tension de bus

L'utilisation d'un plan de surface de réponse permet de détecter plus de la significativité des effets des facteurs intervenant dans ce plan, d'observer la variation de la tension de bus dans le domaine d'étude du plan choisi. En tenant compte toujours de la valeur fixe de la charge et du rapport cyclique. Comme déjà dit, on a conservé ce travail pour la variation des paramètres d'irradiation solaire et de température de surface.

L'analyse statistique repose sur un ensemble de tests décrit sous forme des tableaux permettant chacun d'intervenir des informations sur la variation de la tension de bus. Le tableau 4.16 nous montre la contribution de chaque effet dans le modèle de régression de la réponse, dans un premier temps on utilise un module PV multi-cristallin et dans une seconde partie on utilise un module PV monocristallin.

Le premier cas, On remarque que l'effet de facteur A est le plus actif, contribué avec un pourcentage de 82,7 %, suivi par l'effet du facteur AA avec une contribution de 9,5 % contre une contribution de 4,4 % pour l'effet du facteur B et 2,5 % pour l'effet du facteur AB approximativement.

Table 4.16. Test des effets des paramètres de la réponse tension de bus

Réponses	Source	Degré de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F Ratio	Contribution (%)
Multi-cristallin	A : Ir	1	2024,0067	2024,0067	306,3499	82,658
	B : T	1	106,6817	106,6817	16,1471	4,356
	AB : Ir*T	1	60,8400	60,8400	9,2086	2,484
	AA : Ir*Ir	1	233,6668	233,6668	35,3674	9,542
	BB : T*T	1	4,9543	4,9543	0,7499	0,202
Mono-cristallin	A : Ir	1	859,20667	859,20667	1059,153	83,139
	B : T	1	131,60167	131,60167	162,2268	12,734
	AB : Ir*T	1	36,60250	36,60250	45,1203	3,541
	AA : Ir*Ir	1	3,98679	3,98679	4,9146	0,385
	BB : T*T	1	3,04762	3,04762	3,7568	0,294

Du tableau 4.16, on observe que l'effet du facteur A présente la plus grande la contribution avec 83,7 % contre une contribution de 12,8 % de l'effet du facteur B, suivie d'une contribution de 3,5 % pour l'effet de facteur AB approximativement.

Table 4.17. Table d'ANOVA du modèle de régression de la réponse tension de bus

Réponses	Source	Degré de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F Ratio	Probabilité
Multi-cristallin	Modèle	5	2448,6326	489,727	74,1241	0,0005*
	Erreur	4	26,4274	6,607		
	Total	9	2475,0600			
Mono-cristallin	Modèle	5	1033,4511	206,690	254,7893	<0,0001*
	Erreur	4	3,2449	0,811		
	Total	9	1036,6960			

L'analyse de la variance exprimée par le tableau 4.17, nous renseigne sur la qualité du modèle et les erreurs correspondantes, autant que la somme des carrés des erreurs est faible par rapport à la somme des carrés du modèle, cela admet à des modèles de régressions avec une probabilité de 0,0005 et <0,0001 respectivement. Toute valeur possède le signe (*) est considérée accepté par l'analyse de variance, car elle est inférieure à la valeur critique normalisée par 5 %. Les deux modèles sont acceptés et présentent une dépendance aux facteurs.

Table 4.18. Estimation des paramètres du modèle de la régression de la tension de bus

Réponses	Terme	Coefficients	Erreur Standard	T_Student	Probabilité
Multi-cristallin	Intercepte	94,521429	1,536095	61,53	<0,0001*
	A : Ir	18,366667	1,049353	17,50	<0,0001*
	B : T	-4,216667	1,049353	-4,02	0,0159*
	AB : Ir*T	3,9	1,285189	3,03	0,0386*
	AA : Ir*Ir	10,007143	1,682708	5,95	0,0040*
	BB : T*T	1,4571429	1,682708	0,87	0,4354
Mono-cristallin	Intercepte	93,778571	0,538258	174,23	<0,0001*
	A : Ir	11,966667	0,3677	32,54	<0,0001*
	B : T	-4,683333	0,3677	-12,74	0,0002*
	AB : Ir*T	3,025	0,450339	6,72	0,0026*
	AA : Ir*Ir	-1,307143	0,589632	-2,22	0,0909
	BB : T*T	1,1428571	0,589632	1,94	0,1246

A partir du tableau 4.18, on obtient les coefficients permettant de définir le modèle de régression de la tension de bus, le modèle décrit est utilisé pour estimer les valeurs de la réponse calculée, ainsi si on veut calculer la tension de bus à n'importe quelle valeur de d'irradiation

solaire et de température à condition qu'elle soit à l'intérieur du domaine d'étude. Tout coefficient possède une valeur portant le signe (*) est significatif et doit participer au modèle de régression prédit de la réponse. Les coefficients qui restent sont considérés non actifs.

Les modèles de régressions prédictifs de la tension de bus pour les deux cas de modules PV sont donnés par les équations suivantes :

$$V_{bus_multi} = 94,521 + 18,366x_1 - 4,216x_2 + 3,9x_1x_2 + 10,007x_1^2 \quad (IV.7)$$

$$V_{bus_mono} = 93,778 + 11,966x_1 - 4,683x_2 + 3,025x_1x_2 \quad (IV.8)$$

Déduisant des modèles présentés par les équations IV.7 et IV.8, que l'effet du facteur A à un signe positif, ce qui rend la tension de bus varié positivement avec l'irradiation solaire. Mais l'effet du facteur B à un signe négatif, ce qui signifie que la tension de bus varié dans la direction opposée de la température de surface. Cependant, la tension de bus est fortement liée à l'irradiation solaire que sa dépendance à la température de surface. Le remplacement des valeurs centrées réduites des facteurs, dans les modèles prédit de la tension de bus, permet d'obtenir les valeurs calculées de la réponse.

IV.5.3.2. Courant de bus

De la même façon, le courant de bus est influencé par les facteurs intervenant à l'entrée du système étudié. Le comportement de la réponse courant de bus est similaire à la réponse tension de bus en ce qui concerne la contribution des effets des facteurs dans le modèle prédit de la réponse. Le tableau 4.19 résume le test des effets des paramètres de cette réponse pour les deux types de modules PV.

Table 4.19. Test des effets des paramètres de la réponse courant de bus

Réponses	Source	Degré de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F Ratio	Contribution (%)
Multi-cristallin	A : Ir	1	0,00126150	0,00126150	231,1145	88,23
	B : T	1	0,00008067	0,00008067	14,7786	5,642
	AB : Ir*T	1	0,00002500	0,00002500	4,5802	1,748
	AA : Ir*Ir	1	0,00005833	0,00005833	10,6870	4,079
	BB : T*T	1	0,00000058	0,00000058	0,1069	0,04
Mono-cristallin	A : Ir	1	0,00126150	0,00126150	206,8638	72,834
	B : T	1	0,00021600	0,00021600	35,4202	12,471
	AB : Ir*T	1	0,00011025	0,00011025	18,0791	6,365
	AA : Ir*Ir	1	0,00013886	0,00013886	22,7701	8,017
	BB : T*T	1	0,00000011	0,00000011	0,0176	0,006

Du tableau 4.19, on observe que le facteur A est le plus significatif et présente une contribution d'environ 88,2 % (72,8 %) contre le facteur B avec 5,6 % (12,5 %), le facteur AA avec 4,1% (8 %) et le facteur AB avec une contribution de 1,7 % (6,3 %) pour les deux modules respectivement. Donc, on remarque le facteur le plus influent est l'irradiation solaire suivie par la température de surface, puis l'interaction entre les deux facteurs.

Table 4.20. Table d'ANOVA du modèle de régression de la réponse courant de bus

Réponses	Source	Degré de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F Ratio	Probabilité
Multi-cristallin	Modèle	5	0,00142977	0,000286	52,3884	0,0010*
	Erreur	4	0,00002183	0,00000545		
	Total	9	0,00145160			
Mono-cristallin	Modèle	5	0,00173201	0,000346	56,8037	0,0008*
	Erreur	4	0,00002439	6,098e-6		
	Total	9	0,00175640			

Le tableau 4.20 présente une analyse d'ANOVA du processus global de la réponse courant de bus, et plus précisément sur le modèle qui dépend de cinq effets des facteurs. On observe sur ce tableau que la somme des carrés des erreurs est petite devant la somme des carrés du modèle, garantissant une probabilité assez faible devant la valeur critique, qui rend le modèle acceptable par l'analyse ANOVA. Dans le but d'avoir un modèle mathématique prédictif de la réponse courant de bus, une estimation des coefficients du modèle est nécessaire, ce qui est décrit par le tableau 4.21 suivant :

Table 4.21. Estimation des paramètres du modèle de la régression du courant de bus

Réponses	Terme	Coefficients	Erreur Standard	T_Student	Probabilité
Multi-cristallin	Intercepte	0,1685	0,001396	120,68	<0,0001*
	A : Ir	0,0145	0,000954	15,20	0,0001*
	B : T	0,0036667	0,000954	3,84	0,0184*
	AB : Ir*T	-0,0025	0,001168	-2,14	0,0991
	AA : Ir*Ir	0,005	0,001529	3,27	0,0308*
	BB : T*T	0,0005	0,001529	0,33	0,7601
Mono-cristallin	Intercepte	0,1683571	0,001476	114,08	<0,0001*
	A : Ir	0,0145	0,001008	14,38	0,0001*
	B : T	0,006	0,001008	5,95	0,0040*
	AB : Ir*T	-0,00525	0,001235	-4,25	0,0131
	AA : Ir*Ir	-0,007714	0,001617	-4,77	0,0088*
	BB : T*T	-0,000214	0,001617	-0,13	0,9009

Les modèles prédictifs de la réponse courant de bus résultants pour les deux types de modules alimentant le bus continu HVDC sont donnés par les équations suivantes :

$$I_{bus_multi} = 0,1685 + 0,0145x_1 + 0,0036x_2 + 0,005x_1^2 \quad (IV.9)$$

$$I_{bus_mono} = 0,1683 + 0,0145x_1 + 0,006x_2 - 0,0077x_1^2 \quad (IV.10)$$

On remarque que les effets des facteurs A et B ont des signes positifs, signifiant par ailleurs que le courant de bus varié dans la même direction que l'irradiation solaire et la température de surface respectivement. Ces modèles de régression prédictifs du courant de bus doivent être utilisé pour estimer les valeurs calculées afin de les comparées avec celles d'expérimentations.

IV.5.3.3. Puissance de bus

Il est clair que l'effet du facteur A qui est l'irradiation solaire est pertinent et influe directement sur les réponses du système étudié. Il présente la contribution la plus significative devant les autres effets des facteurs, comme illustré dans le tableau 4.22 de tests des effets des paramètres.

La contribution de l'effet du facteur A est assez remarquable avec 87,7 %, devant la contribution du facteur AA avec 6,9 % et contre seulement 2,5 % de contribution de l'effet du facteur B qui présente la température de surface et de 2 % pour l'effet du facteur AB de l'interaction entre les deux facteurs. Dans le deuxième cas, l'effet du facteur A contribué avec 82,1 % contre une contribution de 15,2 % pour l'effet du facteur B et 2,6 % pour l'effet du facteur AB respectivement. On remarque que les termes quadratiques ne contribuent que par des faibles valeurs au voisinage de zéro.

Table 4.22. Test des effets des paramètres de la réponse puissance de bus

Réponses	Source	Degré de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F Ratio	Contribution (%)
Multi-cristallin	A : Ir	1	132,54000	132,54000	504,1712	87,651
	B : T	1	3,68167	3,68167	14,0048	2,434
	AB : Ir*T	1	3,06250	3,06250	11,6495	2,025
	AA : Ir*Ir	1	10,36012	10,36012	39,4090	6,851
	BB : T*T	1	0,48762	0,48762	1,8549	0,322
Mono-cristallin	A : Ir	1	49,306667	49,306667	297,9148	82,113
	B : T	1	9,126667	9,126667	55,1440	15,199
	AB : Ir*T	1	1,562500	1,562500	9,4407	2,602
	AA : Ir*Ir	1	0,042976	0,042976	0,2597	0,071
	BB : T*T	1	0,002976	0,002976	0,0180	0,004

Plus de détail sur le modèle de la puissance de bus est exprimé par une analyse de variance ANOVA mentionnée par le tableau 4.23. Le modèle total est expliqué par le modèle prédit et l'erreur correspondante, cela traduit le manque d'ajustement du modèle prédictif de la réponse. Toute faible valeur de l'erreur explique le bon ajustement du modèle et la meilleure présentation des données expérimentales. En plus, le modèle sera plus fiable et précis, quand sa probabilité est inférieure à la valeur critique qui est égale à 0,05.

L'analyse statistique est munie d'un calcul de coefficients déterminant le modèle de la puissance de bus, de juger est-il significatif ou non, seulement les coefficients actifs peuvent participés au modèle pour obtenir un modèle effectif et précis.

Table 4.23. Table d'ANOVA du modèle de régression de la réponse puissance de bus

Réponses	Source	Degré de liberté	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F Ratio	Probabilité
Multi-cristallin	Modèle	5	151,21245	30,2425	115,0399	0,0002*
	Erreur	4	1,05155	0,2629		
	Total	9	152,26400			
Mono-cristallin	Modèle	5	60,046976	12,0094	72,5617	0,0005*
	Erreur	4	0,662024	0,1655		
	Total	9	60,709000			

La table 4.24 donne l'estimation des paramètres du modèle de régression de la puissance de bus, obtenus lors d'une simulation sous l'environnement JMP.

Table 4.24. Estimation des paramètres du modèle de la régression de la puissance de bus

Réponses	Terme	Coefficients	Erreur Standard	T_Student	Probabilité
Multi-cristallin	Intercepte	16,221429	0,306412	52,94	<0,0001*
	A : Ir	4,7	0,209319	22,45	<0,0001*
	B : T	-0,783333	0,209319	-3,74	0,0201*
	AB : Ir*T	0,875	0,256362	3,41	0,0269*
	AA : Ir*Ir	2,1071429	0,335657	6,28	0,0033*
	BB : T*T	0,4571429	0,335657	1,36	0,2449
Mono-cristallin	Intercepte	15,107143	0,243124	62,14	<0,0001*
	A : Ir	2,8666667	0,166085	17,26	<0,0001*
	B : T	-1,233333	0,166085	-7,43	0,0018*
	AB : Ir*T	0,625	0,203412	3,07	0,0372*
	AA : Ir*Ir	0,1357143	0,266329	0,51	0,6372
	BB : T*T	0,0357143	0,266329	0,13	0,8998

Tous coefficient du tableau 4.24 possède une probabilité inférieure à la valeur critique de 0,05 est accordé à un signe (*), considéré significatif et influe sur la variation de la réponse.

Les modèles de régressions prédictifs pouvant représenter la puissance de bus de la manière suivante :

$$P_{bus_multi} = 16,221 + 4,7x_1 - 0,783x_2 + 0,875x_1x_2 + 2,107x_1^2 \quad (IV.11)$$

$$P_{bus_mono} = 15,107 + 2,866x_1 - 1,233x_2 + 0,625x_1x_2 \quad (IV.12)$$

L'effet du facteur A à un signe positif, ce qui signifie que la puissance de bus varié dans le même sens que l'irradiation solaire, contrairement à l'effet du facteur B qui possède un signe négatif, d'où la variation de la puissance dans le sens opposé. Ces modèles de la puissance présentent un signe positif.

Les tableaux 4.25 et 4.26 résumant les valeurs des réponses calculées par les modèles prédictifs obtenus ci-dessus, ainsi que les erreurs entre les valeurs estimées par le modèles avec celles d'expérimentations, et ceux pour les deux modules PV.

Table 4.25. Erreur des trois réponses du module multi-cristallin

Multi-cristallin									
Exp.: Données Expérimentales; Mod.: Données Calculées du modèle prédictif; E_r (%).									
Tension de bus (V)			Courant de bus (A)			Puissance de bus (W)			
N°	Exp.	Mod.	E_r	Exp.	Mod.	E_r	Exp.	Mod.	E_r
01	97,5	96.78	-0.74	0,152	0.153	0.66	16,2	15.92	-1.73
02	83,3	84.94	1.97	0,159	0.16	0.63	13,1	13.43	2.52
03	80,6	79.69	-1.13	0,167	0.166	-0.6	12,5	12.45	-0.4
04	98,5	99.81	1.33	0,168	0.166	-1.19	16,9	17.39	2.9
05	97,5	94.91	-2.66	0,168	0.168	0	16,5	16.34	-0.97
06	93,6	94.06	0.49	0,169	0.169	0	16,3	16.19	-0.67
07	91,4	92.22	0.9	0,170	0.172	1.18	16,1	15.88	-1.37
08	124,6	124.3	-0.24	0,186	0.187	0.54	23,5	23.33	-0.72
09	123,7	124.01	0.25	0,188	0.187	-0.53	23,2	23.29	0.39
10	123,3	123.29	-0.01	0,191	0.191	0	23,3	23.38	0.34

On remarque des résultats des calculs des erreurs entre les valeurs estimés et les valeurs mesurées donnés par les tableaux 4.25 et 4.26 l'existence des valeurs des erreurs importantes,

qui peuvent être traduit par un modèle moins précis ou par un manque d'ajustement. Bien qu'elles existent toujours des erreurs de mesures et des erreurs des appareils.

Table 4.26. Erreur des trois réponses du module monocristallin

Monocristallin									
Exp.: Données Expérimentales; Mod.: Données Calculées du modèle prédictif; E_r (%).									
N°	Tension de bus (V)			Courant de bus (A)			Puissance de bus (W)		
	Exp.	Mod.	E_r	Exp.	Mod.	E_r	Exp.	Mod.	E_r
01	89,3	88.84	-0.52	0,134	0.135	0.75	14,2	14.08	-0.85
02	80,8	82.39	1.97	0,145	0.144	-0.69	12,3	12.81	4.15
03	73,7	72.57	-1.53	0,159	0.16	0.63	10,7	10.31	-3.64
04	99,6	96.06	-3.55	0,164	0.166	1.22	16,6	15.58	-6.14
05	94,8	94.88	0.08	0,168	0.167	-0.6	15,6	15.29	-1.99
06	92,4	93.86	1.58	0,170	0.169	-0.59	14,6	15.01	2.81
07	90,6	92.6	2.21	0,171	0.171	0	13,7	14.62	6.72
08	107,3	107.82	0.48	0,173	0.173	0	18,6	18.75	0.81
09	104,5	104.31	-0.18	0,175	0.176	0.57	18,2	18.21	0.05
10	103,8	103.47	-0.32	0,177	0.177	0	17,6	17.44	-0.91

Le tableau 4.27 résume les estimations des coefficients de corrélation multiple et de l'erreur quadratique moyenne, comme des paramètres de validations des résultats obtenus par la simulation.

Table 4.27. Estimation de coefficient de corrélation multiple et l'erreur quadratique moyenne du modèle de régression multiple

	R^2_{adj}		RMSE	
	Multi-cristallin	Monocristallin	Multi-cristallin	Monocristallin
V_{bus}	0,975976	0,992957	2,570378	0,900678
I_{bus}	0,966158	0,968752	0,002336	0,002469
P_{bus}	0,984461	0,975464	0,512725	0,406824

IV.5.4. Analyse graphique de la technique de surface de réponse

L'analyse graphique est une façon servant à l'interprétation des résultats obtenus par la simulation et la modélisation du système d'étude. En plus, on peut déduire rapidement des conclusions sur le comportement des réponses étudiées en fonction des facteurs pertinents.

Le tracé des surfaces de réponses permet de juger la variation des réponses, quant à elle maximale et quant à elle minimale tout dépend de la variation simultanée des facteurs.

IV.5.4.1. Analyse graphique pour module multi-cristallin

Au-delà de la figure IV.18 qui illustre les tracés de surfaces de réponses et les courbes de contours des trois réponses désirées : tension de bus, courant de bus et puissance de bus. On observe que les trois réponses sont variées dans la même direction de variation de l'irradiation solaire et avec une grande amplitude, mais présentent un comportement différent avec la variation de la température de surface.

Toute augmentation de la température de surface entraîne une diminution rapide de la tension de bus comme le montre la figure IV.18 (a), la puissance de bus subit aussi une diminution mais légèrement par rapport à la tension de bus comme illustré par la figure IV.18 (c). Le courant de bus présenté par la figure IV.18 (b) augmente légèrement avec la température contrairement aux deux autres réponses.

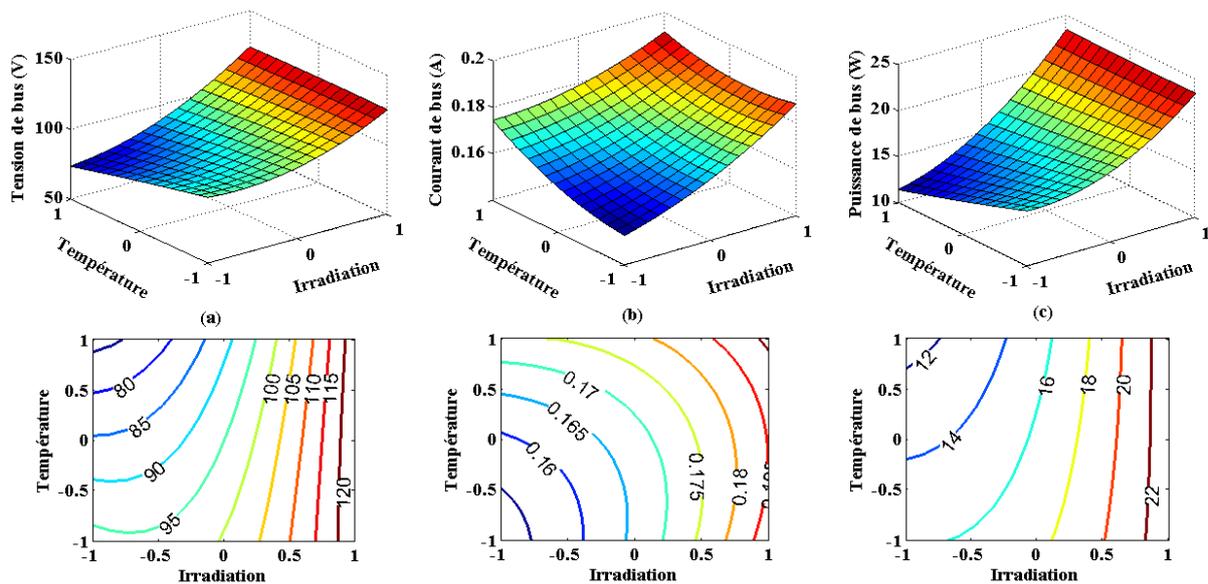


Fig. IV. 18. Surface de réponse et courbe de contours des réponses du module multi-cristallin (a) tension de bus, (b) courant de bus, (c) puissance de bus respectivement.

IV.5.4.2. Analyse graphique pour module monocristallin

Le même comportement peut tirer de la figure IV.19, où toute augmentation de l'irradiation solaire entrainera une croissance des trois réponses de l'étude respectivement. Mais l'effet de la température est inversement agit sur la réponse tension de bus ainsi que la réponse puissance de bus comme montré par la figure IV.19 (a) et (b) respectivement.

La tension de bus atteinte sa valeur maximale pour un éclairage maximale mais pour une température de l'ordre de 30 °C, le comportement de la puissance de bus est similaire à celle de la tension de bus.

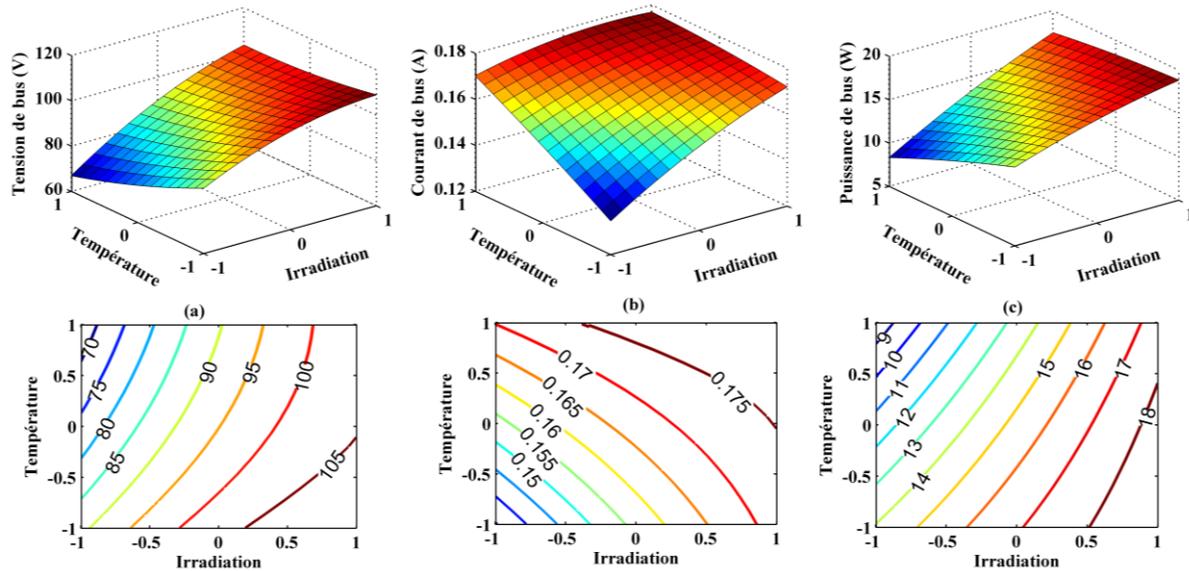


Fig. IV. 19. Surface de réponse et courbe de contours des réponses du module monocristallin (a) tension de bus, (b) courant de bus, (c) puissance de bus respectivement.

Les résultats obtenus avec un nombre d'expérimentation réduit grâce à notre modélisation faite avec la méthode *DoE* montrent clairement que les trois réponses décrivant le comportement du bus continu HVDC sont fortement influencées par l'irradiation solaire. Comme attendu avec les générateurs de production d'électricité d'origine photovoltaïque, l'augmentation de l'irradiation solaire entrainera une croissance rapide des réponses du courant, de la tension et donc finalement de la valeur de la puissance maximum disponible. Nous constatons également que, l'augmentation de la température de surface entraîne une décroissance rapide de la tension de bus, diminuant ainsi la puissance de bus.

IV.6. Conclusion

Ce chapitre est consacré à la modélisation et à la caractérisation du bus continu HVDC photovoltaïque par la méthode des plans d'expériences, il a été basé sur un circuit alimenté par un module PV de technologies multi-cristalline et monocristalline soumis à des variations simultanées des facteurs en entrée permettant d'étudier le comportement de la réponse en sortie. Le circuit est un convertisseur Boost MCB doté d'un algorithme de poursuite du point de puissance maximale MPPT, pour maintenir le fonctionnement du Boost en son point de puissance maximale, garantissant à la charge continue une tension et un courant maximum.

L'application de la méthode des plans d'expériences dans ce domaine d'étude est assez récente. Par ailleurs, quel que soit les méthodes possibles, peu de travaux sur la caractérisation de bus continu HVDC sont faites malgré le fort développement actuel de ce type de réseau de distribution qui connaît un accroissement très important avec notamment les nouvelles applications domestiques et à l'accroissement du marché des véhicules électriques. Notre étude est en cela originale en permettant d'obtenir rapidement des résultats acceptés car précis en comparaison avec ce qui sont obtenus par des méthodes classiques de caractérisation.

Des modèles de régression prédictifs ont été achevés par deux techniques décrites dans ce manuscrit : la technique de criblage ou de screening et la technique de surface de réponse. Les deux techniques permettent d'étudier et d'estimer les coefficients de ces modèles ainsi que leurs significativités ou non dans les modèles prédictifs, en plus de savoir comment se fait la variation des réponses désirées sous l'influence des facteurs choisis.

Le test statistique est le moyen d'interpréter les résultats soit par une analyse de variance ANOVA ou par une analyse graphique des deux techniques utilisées. Ces analyses statistiques permettent de valider les résultats obtenus par la simulation par un calcul des coefficients de corrélation multiple comme critère de qualité des modèles prédits. Des graphiques servant d'aider à l'interprétation rapide des résultats obtenus par l'analyse.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Notre travail de thèse s'est déroulé dans le Laboratoire de Génie Electrique et Energies Renouvelables LGEER de l'université Hassiba Ben Bouali de Chlef, Algérie en collaboration avec le Laboratoire de Matériaux Optiques Photoniques et Systèmes LMOPS de l'université de Lorraine de Metz, France. Dans le but d'optimiser le rendement d'une chaîne de conversion photovoltaïque alimentant une charge continue à travers un bus continu haute tension HVDC, on a été opté pour trouver un modèle mathématique prédictif caractérisant le transfert d'énergie électrique en utilisant la méthode des plans d'expériences (en Anglais : Design of Experiments method *DoE*).

Ce travail de thèse est consacré à la modélisation et à la caractérisation de module PV et de bus continu HVDC par les plans d'expériences, assurant par ailleurs un transfert maximal de la puissance résultante d'un module PV vers une charge continue, garantissant le transport de cette puissance par un bus continu HVDC photovoltaïque. Des convertisseurs DC/DC à haut rendement qui utilisent un couplage magnétique capable de délivrer de la haute tension sur un bus HVDC. Notre objectif est de modéliser l'influence des paramètres environnementaux sur le comportement de la chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque, constituée d'un générateur PV, un convertisseur d'énergie alimentant un bus continu de transport, destiné au transport d'énergie électrique via un bus continu haute tension. Donc, notre contribution est une étude beaucoup plus mathématique statistique, elle nécessite un bagage statistique et algébrique.

Dans le cadre de notre thématique de recherche, nous avons procédé à la modélisation et à la caractérisation de module photovoltaïque de différentes technologies : monocristalline, multicristalline et amorphe ainsi que le bus continu HVDC (High Voltage Direct Current) par la méthode des plans d'expériences. L'objectif principal de cette contribution est d'appliquer la méthode des plans d'expériences pour étudier le comportement du système sous différentes conditions d'irradiation solaire et de température de surface de module PV, ainsi que les effets moyens et les effets d'interactions entre les variables d'entrée et leur influence sur une sortie désirée. Une étape de planification et de description du système étudié est nécessaire pour le choix d'un plan d'expérience convenable utile et suffisant pour réaliser les expériences voulues.

Avant d'aller directement à la problématique et à l'étude détaillée du système à concevoir, nous avons jugé utile de présenter les différentes technologies de module photovoltaïque afin de connaître tous les types de cellules PV et leur rendement actuel dans l'industrie du solaire et ceux atteints aux niveaux de laboratoires de recherches.

Dans un premier temps, Une démarche expérimentale des plans d'expériences est faite, elle repose essentiellement sur trois étapes distinctes à suivre pendant chaque application de la méthode des plans d'expérience :

- la définition de l'objectif de l'étude en choisissant la réponse du système à étudier afin d'atteindre l'objectif, les facteurs susceptibles de modifier cette réponse et le plan d'expérience convenable déterminé par un domaine d'étude, ce dernier est limité par des points expérimentaux,

- une réalisation des expériences choisies auparavant par l'expérimentateur, suivie par une analyse statistique permettant d'aboutir aux résultats,
- une interprétation des résultats obtenus par simulation des procédés expérimentaux.

Dans un second temps, et après avoir une connaissance approfondie et une maîtrise de la méthode des plans d'expériences, une modélisation mathématique de module PV est faite. La modélisation mathématique consiste à estimer, grâce à la méthode des moindres carrés, les p coefficients du modèle ainsi que les résidus, à savoir les écarts entre les valeurs observées et les valeurs prévues par le modèle pour chacun des N essais du plan d'expériences. Connaissant une estimation des coefficients du modèle, il est possible d'utiliser ce dernier afin de prévoir la réponse pour chacun des traitements du plan d'expériences. Un modèle mathématique est établi via la *DoE*. Ce modèle permettra de prédire l'évaluation des trois paramètres essentiels dans la courbe caractéristique courant-tension I-V des générateurs solaires photovoltaïques. Les trois paramètres concernés sont : la puissance maximale P_m , le courant de court-circuit I_{cc} et la tension à circuit ouvert V_{co} mentionnés sur la courbes I-V par les points (I_{mp}, V_{mp}) , $(I_{cc}, 0)$ et $(0, V_{co})$ respectivement. Pour ce faire ; un banc d'essais monté a servi à la caractérisation tous en exploitant des données expérimentales. Une analyse statistique est utilisée pour valider les résultats obtenus. Bien que, la *DoE* ne fait appel que les variables d'entrées qui sont les facteurs et les variables de sorties qui sont les réponses du système. Nous avons donc élaboré un modèle prédictif des trois paramètres représentatifs sous l'influence des facteurs d'entée à savoir l'irradiation solaire et la température de surface dans le domaine d'étude sélectionné.

A cet effet, nous avons en premier lieu simulé le comportement d'un module PV multicristallin, en choisissant le plan d'expérience qui répond à l'objectif défini au début de l'étude. Deux techniques ont été introduites pour étudier et évaluer l'influence simultanée de différents paramètres d'entrées intervenant dans la modélisation de ce système sur les réponses désirées : le courant de court-circuit, la tension à circuit ouvert et la puissance maximale disponible sur le module PV. En effet, les deux techniques qui sont la technique de criblage ou de screening et la technique de surface de réponse, nécessitant un test statistique.

Une analyse statistique est présente, elle repose sur deux aspects distincts : une analyse de variance et une analyse graphique. L'analyse de variance permettant de définir la qualité du modèle prédit de la réponse, d'évaluer et d'estimer les coefficients décrivant le modèle de la réponse en utilisant la méthode des moindres carrés qui minimise la somme des carrés des résidus et de déterminer la significativité de ces coefficients et leur influence sur la variation de la réponse voulue. Cependant une analyse graphique permettra de décrire la variation de la réponse désirée sous l'influence de l'irradiation solaire et de la température de surface par des tracés en deux dimensions et trois dimensions. Ensuite, une généralisation de ce procédé sur les deux autres modules PV : le module PV monocristallin et le module amorphe.

Dans une dernière phase de cette thèse, une étude concernera l'établissement d'un modèle prédictif comportemental des trois réponses désirées : de la tension, du courant et de la puissance du bus continu HVDC photovoltaïque tout en considérant le changement des facteurs environnementaux à savoir l'irradiation solaire et la température de surface de module PV autant que variable d'entrées du système considéré comme une boîte noire (black box) par la

méthode *DoE*. Une étude, évaluation et estimation de la qualité du modèle de régression prédictif de la réponse choisie, des coefficients déterminant ce modèle et de leur caractère significatif ou non.

L'analyse statistique permet d'aboutir à la construction du tableau d'analyse de régression et à la détermination de la qualité descriptive du modèle. L'analyse de régression consiste à expliquer la variation totale de la réponse. L'analyse statistique du modèle dans sa globalité se poursuit par la construction d'un test statistique, visant à affecter une probabilité à l'hypothèse nulle (H_0) qui dit que le modèle ne permet pas de décrire la variation des résultats d'essais. Nous avons vu comment calculer la qualité descriptive d'un modèle à partir du coefficient de corrélation multiple ajusté ou coefficient de détermination ajusté. Plus la valeur du coefficient de détermination ajusté est proche de 1 et plus la qualité descriptive du modèle est satisfaisante.

Les résultats obtenus sont donnés sous forme de tableaux d'ANOVA, et sous forme de graphiques, on peut tracer les effets des facteurs sur les réponses étudiées, ainsi que les effets d'interaction entre les facteurs eux-mêmes. La méthode offre la possibilité d'avoir des informations en utilisant les surfaces de réponses et les courbes de contours dans un domaine d'étude bien déterminé.

Comme perspectives à nos travaux sur la modélisation et la caractérisation du bus continu HVDC photovoltaïque par les plans d'expériences, nous favorisons d'augmenter le nombre de paramètres à l'entrée du circuit de conversion d'énergie et même les paramètres internes qui influencent sur le module PV, de comparer les résultats obtenus avec ce montage à base d'un boost à couplage magnétique avec un montage à boost classique. Une comparaison entre différentes algorithmes de commande MPPT est faisable pour étudier le rendement d'un circuit de conversion d'énergie électrique à base d'une source photovoltaïque.

RÉFÉRENCES

Références

- [Abad11] Abada S.
Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur SEPIC.
Mémoire de Maîtrise en génie électrique.
Université Laval de Québec, 2011.
- [Abbe13] Abbes H., Abid H., Loukil K., Toumi A., Abid M.
Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque.
Conférence Internationale des Energies Renouvelables (CIER'13).
Sousse, Tunisie, 2013
- [Abbe14] Abbes H., Abid H., Loukil K., Toumi A. et Abid M.
Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque.
Revue des Energies Renouvelables. Vol. 17, N°3, pp. 435 – 445, 2014.
- [Adem19] L'électricité solaire.
<https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/guide-pratique-electricite-solaire.pdf>, 2019.
- [AlAt05] Al-Atrash H., Batarseh I., Rustom K.
Statistical modeling of DSP-based hill-climbing MPPT algorithms in noisy environments.
Conference and Exposition in Twentieth Annual IEEE Conference in Applied Power Electronics. Vol. 3, pp. 1773 – 1777, 2005.
- [Alkh11] Alkhalil F.
Supervision, économie et impact sur l'environnement d'un système d'énergie électrique associé à une centrale photovoltaïque.
Thèse de Doctorat.
l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2011.
- [Allo17] Allouache H.
Caractérisation d'Ombrage d'un Système Photovoltaïque à Bus Continu HVDC.
Thèse de Doctorat.

- Université d'Oran, 2017.
- [Allo15] Allouache H., Zegaoui A., Arab M., Belmadani B., Aillerie M. Distributed Photovoltaic Architecture for HVDC-bus Feeding with a Simple Evaluation of Optimal Tracking. Energy Procedia. Vol. 74, pp. 507 – 517, 2015.
- [Alme17] Almeida M. P., Muñoz M., Parra I., Perpiñán O. Comparative study of PV power forecast using parametric and nonparametric PV models. Solar Energy. Vol. 155, pp. 854 – 866, 2017.
- [Amar14] Amarouayache M. Contribution à l'optimisation d'une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque. Thèse de Doctorat. Université Constantine 1, 2014.
- [Anka13] Ankaiah B., Nageswararao J. Enhancement of Solar Photovoltaic Cell by Using Short-Circuit Current MPPT Method. International Journal of Engineering Science Invention. Vol. 2, N° 2, pp. 45 – 50, 2013.
- [Anto14] Antony J. Design of Experiments for Engineers and Scientists. 2nd Ed., Elsevier, UK, 2014.
- [Arab18] Arab M. La conversion haut rendement des énergies renouvelables par onduleur monophasé connecté sur bus HVDC et relié réseau. Thèse de Doctorat. Université de Chlef, 2018.
- [Bail10] Bailly L. Cellules photovoltaïques organiques souples à grande surface. Thèse de Doctorat. Université bordeaux I, 2010.
- [Bart99] Barton R. R. Graphical methods for the design of experiments. Springer, New York, 1999.
- [Belk15] Belkaid A.

- Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome.
Thèse de Doctorat.
Université Ferhat Abbas - SETIF 1, 2015.
- [Bend15] Bendato I., Cassettari L., Mosca M., Mosca R.
A design of experiments/response surface methodology approach to study the economic sustainability of a 1 MWe photovoltaic plant.
Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 51, pp. 1664 – 1679, 2015.
- [Bern09] Bernard C., Sebrao – oliveira C., Laval B., Vaudouer C.
Panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue.
Rapport rédigé dans le cadre de l'UV BA04 – Energie renouvelables.
Université de Technologie, Compiègne, 2009.
- [Bisq18] Bisquet J.
The physics of solar cells Perovskites, Organics, and Photovoltaic Fundamentals.
Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2018.
- [Boit08] Boitier V., Maussion P., Cabal C.
Recherche du maximum de puissance sur les générateurs photovoltaïques.
Revue 3E.I. N° 54, pp. 90 – 96. 2008.
- [Boui19] Bouima H.
Elaboration et Caractérisation de Couches Minces de Cu (In,Ga)(Se,S)₂ destinées au Photovoltaïque.
Thèse de Doctorat.
Université de Sétif 1, 2019.
- [Bouk11] Boukli-Hacene O.
Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleure gestion énergétique.
Mémoire de Magister.
Université de Tlemcen, 2011.
- [Caba08] Cabal C.

- Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque.
Thèse de Doctorat.
Université de Toulouse, 2008.
- [Cava07] Cavalcanti M. C., Oliveira K. C., Azevedo G. M. S., Neves F. A. S.
Comparative study of maximum power point tracking techniques for photovoltaic systems.
Eletrônica de Potência. Vol. 12, N° 2, pp. 163 – 171, 2007.
- [Char14] Charles J. P., Hannane F., El Mossaoui H., Zegaoui A., Nguyen T. V., Petit P., Aillerie M.
Faulty PV panel identification using the Design of experiments (DoE).
Electrical Power and Energy Systems. Vol. 57, pp. 31 – 38, 2014.
- [Char15] Charles J. P., Aillerie M., Petit P., Hannane F., El Mossaoui H.
Warning of accidental shadowing of a PV generator in operation analyzed with the DoE method.
Solar Energy. Vol. 122, pp. 455 – 463, 2015.
- [Chen17] Chenche L. E. P., Mendoza O. S. H., Filho E. P. B.
Comparison of four methods for parameter estimation of mono- and multi-junction photovoltaic devices using experimental data.
Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 81, pp. 2823 – 2838, 2017.
- [Cher12] Chermitti A., Boukli-Hacene O., Mouhadjer S.
Design of a Library of Components for Autonomous Photovoltaic System under Matlab/Simulink.
International Journal of Computer Applications (0975 – 8887). Vol. 53, N°14, pp. 13 – 19, 2012.
- [Cher14] Chermittia A., Boukli-Hacene O., Meghebbar A., Bibitrikia N., Kherous A.
Design of a library of components for autonomous photovoltaic system under Matlab/Simulink.
Physics Procedia. Vol. 55, pp. 199 – 206, 2014.
- [Cohe16] Cohen A., Tiplica T., Kobiet A.
Design of experiments and statistical process control using wavelets analysis.

- Control Engineering Practice. Vol. 49, pp. 129 – 138, 2016.
- [Cong13] Congedo P. M., Malvoni M., Mele M., De Giorgi M. G. Performance measurements of monocrystalline silicon PV modules in South-eastern Italy. Energy Conversion and Management. Vol. 68, pp. 1 – 10, 2013.
- [Cucu17] Cucumo M. A., Ferraro V., Kaliakatsos D., Mele M., Cucumo D. Equivalent electrical circuit to estimate the PV/T solar collector producibility. International journal of heat and technology. Vol. 35, N° 4, pp. 843 – 852, 2017.
- [Dagn12] Dagnelie P. Principes d'expérimentations planification des expériences et analyse de leurs résultats. Presses agronomiques de Gembloux. Belgique, 2012.
- [Das16] Das S., Sadhu P. K., Chakraborty S., Banerjee S. Saha T. Design and implementation of an intelligent dual axis automatic solar tracking system. Revue Roumaine des Sciences Techniques - Série Électrotechnique et Énergétique. Vol. 61, pp. 383 – 387, 2016.
- [Dodg04] Dodge Y., Rousson V. Analyse de régression appliquée. Dunod, 2004.
- [Droe97] Driesbeke J. J., Fine J., Saporta G. Plans d'expériences- applications à l'entreprise. Ed. Technip, 1997.
- [ElAc18] El Achouby H., Zaimi M., Ibral A., Assaid E. M. New analytical approach for modelling effects of temperature and irradiance on physical parameters of photovoltaic solar module. Energy Conversion and Management. Vol. 177, pp. 258 – 271, 2018.
- [Elge12] Elgendy M. A., Bashar Z., Atkinson D. J. Assessment of Perturb and Observe MPPT Algorithm Implementation Techniques for PV Pumping Applications.

- IEEE Transactions on Sustainable Energy. Vol. 3, N° 1, pp. 21 – 33, 2012.
- [Elib17] Elibol E., Özmen Ö. T., Tutkun N., Köysal O.
Outdoor performance analysis of different PV panel types.
Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 67, pp. 651 – 661, 2017.
- [ElKh16] El-Khozondar H., El-Khozondar R. J., Matte K., Suntio T. A.
review study of photovoltaic array maximum power tracking algorithms.
Renewables: Wind, Water, and Solar. Vol. 3, N°3, 2016.
- [Fauc06] Faucher J.
Les plans d'expériences pour le réglage de commandes à base de logique floue.
Thèse de Doctorat.
Institut National Polytechnique De Toulouse, 2006.
- [Fich71] Ficher R. S.
The design of experiments. Hafner Publishing Company, New York, 1971.
- [Flèc07] Flèche B., Delagnes D.
Energie solaire photovoltaïque.
STI ELT, pp. 1 – 18, 2007.
- [Fraa14] Fraas L. M.
Low-Cost Solar Electric Power, DOI: 10.1007/978-3-319-07530-3_1.
Springer International Publishing Switzerland 2014.
- [Frau19] Fraunhofer ISE.
www.ise.fraunhofer.de/en/publications/studies/photovoltaics-report.html, 2019.
- [Fuen07] Fuentes M., Nofuentes G., Aguilera J., Talavera D. L., Castro M.
Application and validation of algebraic methods to predict the behavior of crystalline silicon PV modules in Mediterranean climates.
Solar Energy. Vol. 81, pp. 1396 – 1408, 2007.
- [Gao18] Gao Q., Zhang Y., Yu Y., Liu Z.

- Direct current-voltage measurement method for smart photovoltaic modules with submodule level power optimizers. *Solar Energy*. Vol. 167, pp.52 – 60, 2018.
- [Gill97] Gillon F.
Modélisation et optimisation par plans d'expérience d'un moteur à commutations électroniques.
Thèse de Doctorat.
Université de Lille, 1997.
- [Gime08] Gimeno A.
Optimisation d'un alternateur par la méthode des plans d'expériences.
Journée des jeunes chercheurs en génie électrique JCGE'08 LYON, 16 et 17 décembre 2008.
- [Giud16] Giudicelli E.
Evaluation d'une filière technologique de cellules photovoltaïques multi-jonctions à base de matériaux antimoniures (III-V)-Sb pour applications aux très fortes concentrations solaires.
Thèse de Doctorat.
Université de Montpellier, 2016.
- [Gord15] Gordon S.
Design of Experiments, in: Loper, M.L. (ed.), *Modeling and Simulation in the Systems Engineering Life Cycle*, Simulation Foundations, Methods and Applications, pp. 187 – 200. London, 2015.
- [Goup93] Goupy J.
Methods for experimental design Principles and applications for physicists and chemists.
Data handing in science and technology. Paris, 1993.
- [Goup96] Goupy J.
Unconventional experimental designs Theory and application. *Chemometrics and intelligent laboratory systems*. Vol. 33, pp. 3 – 16, 1996.
- [Goup05] Goupy J.
Pratiquer les plans d'expériences.
Dunod, Paris, 2005.
- [Goup06a] Goupy J.

- Les plans d'expériences.
Revue MODULAD, N° 34, pp. 74 – 116, 2006.
- [Goup13] Goupy J.
Introduction aux plans d'expériences avec applications.
5th Ed. Dunod, Paris, 2013.
- [Goup06b] Goupy J., Creighton L.
Introduction aux plans d'expériences.
3rd Ed. Dunod, Paris, 2006.
- [Goup07] Goupy J., Ceighton L. Introduction to design of experiments with JMP Examples.
3rd Ed. USA: SAS, 2007.
- [Gree19] Green M. A., Hishikawa Y., Dunlop E. D., Levi D. H., Hohl-Ebinger J., Yoshita M., Ho-Baillie A. W. Y.
Solar cell efficiency tables.
Progress in Photovoltaics: Research and Applications. Vol. 27, p. 3 – 12, 2019.
- [Guel16] Guellal A., Mokhtari A., Kherchi M.
La Commande MPPT Basée sur les Algorithmes Intelligents Destinée aux Applications Photovoltaïques : Etude comparative et implémentation sur FPGA.
Le 4^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables.
Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa – Algeria 24 – 25, Octobre 2016.
- [Guen16] Guenounou A., Malek A., Aillerie M.
Comparative performance of PV panels of different technologies over one year of exposure: Application to a coastal Mediterranean region of Algeria.
Energy Conversion and Management. Vol. 114, pp. 356 – 363, 2016.
- [Hann13] Hannane F., El Mossaoui H., Nguyen T.V., Petit P., Aillerie M., Charles J. P.
Forecasting the PV panel operating conditions using the Design of experiments method.
Energy Procedia. Vol. 36, pp. 479 – 487, 2013.
- [Hasa16] Hasan M. A., Parida S. K.

- An overview of solar photovoltaic panel modeling based on analytical and experimental viewpoint.
Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 60, pp. 75 – 83, 2016.
- [Hlai16] Hlaili M., Mechergui H.
Comparison of Different MPPT Algorithms with a Proposed One Using a Power Estimator for Grid Connected PV Systems. Hindawi Publishing Corporation International Journal of Photoenergy. 2016.
- [Hoin09] Hoinard C.
Les méthodes d'optimisation, cours et énoncés d'exercices, Faculté des sciences pharmaceutiques de Tours, 2009.
- [Huss04] Hussein H. M. S., Ahmad G. E., El-Ghetany H. H. Performance evaluation of photovoltaic modules at different tilt angles and orientations.
Energy Conversion and Management. Vol. 45, pp. 2441 – 2452, 2004.
- [Isha11] Ishaque K., Salem Z.
An improved modeling method to determine the model parameters of photovoltaic (PV) modules using differential evolution (DE).
Solar Energy. Vol. 85, pp. 2349 – 2359, 2011.
- [Jena15] Jena D., Ramana V. V.
Modeling of photovoltaic system for uniform and non-uniform irradiance: A critical review.
Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 52, pp. 400 – 417, 2015.
- [Kach11] Kachhiya K., Lokhande M., Patel M.
MATLAB/Simulink Model of Solar PV Module and MPPT Algorithm.
National Conference on Recent Trends in Engineering & Technology. India, 2011.
- [Kaly14] Kalyan Kumar K., Bhaskar R., Koti H.
Implementation of MPPT algorithm for solar photovoltaic cell by comparing short-circuit method and incremental conductance method.
Procedia Technology. Vol. 12, pp. 705 – 715, 2014.

- [Kand17] Kandemir E., Cetin N. S., Borekci S.
A comprehensive overview of maximum power extraction methods for PV systems.
Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 78, pp. 93 – 112, 2017.
- [Kara04] Karam S.
Application de la méthodologie des plans d'expériences et de l'analyse de données à l'optimisation des processus de dépôt.
Thèse de Doctorat.
Université de Limoges, 2004.
- [Kess15] Kessaissia F. Z., Zegaoui A., Hadj Arab A., Loukarfi L., Aillerie M.
Comparison of Two PV modules Technologies Using Analytical and Experimental Methods.
Energy Procedia. Vol. 74, pp. 389 – 397, 2015
- [Kess18] Kessaissia F. Z., Zegaoui A., Boutoubat M., Allouache H., Aillerie M., Charles J.P.
The DoE method as an efficient tool for modeling the behavior of mono-crystalline Si-PV module.
AIP Conference Proceedings 1968: 030059, 2018.
- [Kess20a] Kessaissia F. Z., Zegaoui A., Aillerie M., Arab M., Boutoubat M., Fares Ch.
Factorial design and response surface optimization for modeling photovoltaic module parameters.
Energy Reports. Vol. 6, pp. 299 – 309, 2020.
- [Kess20c] Kessaissia F. Z., Zegaoui A., Aissa Bokhtache A., Toualbia A., Allouache H.
Comparative Analysis of Two Methods of Modeling a Mono-Crystalline Silicon PV Module.
Springer Nature Singapore, Proceedings of the 1st International Conference on Renewable Energy and Energy Conversion, pp. 383 – 389, 2020.
- [Kess20b] Kessaissia F. Z., Zegaoui A., Taleb R., Fares Ch., Aillerie M.
Design of experiments approach for modeling the electrical response of a photovoltaic module.
Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. Vol. 20, N°3, pp. 1140 – 1147, 2020.
- [Kodi10] Kodigala S.R.

- Thin films and nanostructures Cu (In_{1-x}Gax) Se₂ based thin film solar cells.
Academic Press – Elsevier. Vol. 35, 2010.
- [Kuma17] Kumar P.
Organic solar cells: device physics, processing, degradation, and Prevention.
Taylor & Francis Group, LLC, 2017.
- [Lemo16] Lemonakis N., Skaltsounis A. L., Tsarbopoulos A., Gikas E.
Optimization of parameters affecting signal intensity in an LTQ-orbitrap in negative ion mode: a design of experiments.
Talanta. Vol. 147, pp. 402 – 409, 2016.
- [Li05] Li M. H., Hong S. H.
Optimal parameter design for chip-on film technology using the Taguchi method.
International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol. 25, pp.777 – 782, 2005.
- [Liao08] Liao H. -T., Shie J. -R., Yang Y. -K.
Applications of Taguchi and design of experiments methods in optimization of chemical mechanical polishing process parameters.
International Journal of Advanced Manufacturing Technology. Vol. 38, pp. 674 – 682, 2008.
- [Lind05] Linder R.
Les plans d'expériences Un outil indispensable à l'expérimentateur.
Presses de l'école nationale des ponts et chaussées. Paris, 2005.
- [Lope18] Lopez-Garcia J., Sample T.
Evolution of measured module characteristics versus labelled module characteristics of crystalline silicon based PV modules.
Solar Energy. Vol. 160, pp. 252 – 259, 2018.
- [Mamb14] Mambrini T.
Caractérisation de panneaux solaires photovoltaïques en conditions réelles d'implantation et en fonction des différentes technologies.
Thèse de Doctorat.
Université Paris-sud, 2014.
- [Manu19] Manukonda D., Gorantla S. R.

- Design and Comparison of Standalone Bladeless Wind Solar Hybrid System with the Conventional Standalone Wind Solar Hybrid System.
European Journal of Electrical Engineering. Vol. 21, N°3, pp. 327 – 332, 2019.
- [Mell18] Mellit A., Tina G. M., Kalogirou S. A.
Fault detection and diagnosis methods for photovoltaic systems: A review.
Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 91, pp. 1 – 17, 2018.
- [Mens19] Mensia N., Talbi M., Bouicha M.
Modelling of Photovoltaic Water Pumping System Based on Artificial Intelligence.
Advances in Modelling and Analysis. Vol. 62, N° 1, pp. 11 – 17, 2019.
- [Mich15] Michaelis M., Leopold C. S.
A measurement system analysis with design of experiments: Investigation of the adhesion performance of a pressure sensitive adhesive with the probe tack test.
International Journal of Pharmaceutics. Vol. 496, pp. 448 – 456, 2015.
- [Mikk17] Mikko M.
Experimental design and response surface methodology in energy applications: A tutorial review.
Energy Conversion and Management. Vol. 151, pp. 630 – 640, 2017.
- [Moço16] Moçotéguy P., Ludwing B., Steiner N. Y.
Application of current steps and design of experiments methodology to the detection of water management faults in a proton exchange membrane fuel cell stack.
Journal of Power Sources. Vol. 303, pp. 126 – 136, 2016.
- [Mont07] Montevechi J. A. B., De Pinho A. F., Leal F., Marins F. A. S.
Application of design of experiments on the simulation of a process in an automotive industry.
Proceedings of the winter simulation conference, pp. 1601 – 1609, 2007.
- [Mont97] Montgomery D. C.
The Design and Analysis of Experiments.

- Wiley, New York, 1997.
- [Ndoy09] Ndoye S., Ly I., Barro F. I., Lemrabott O. H., Sissoko G. Modélisation et simulation sous matlab/simulink de la chaine D'alimentation d'une station relais de télécommunications en énergie Solaire photovoltaïque dans une zone isolée du réseau électrique. Journal des Sciences. Vol. 9, N° 2, pp. 45 – 55, 2009.
- [Pami19] Pamir Aly Sh., Ahzi S., Barth N. An adaptive modelling technique for parameters extraction of photovoltaic devices under varying sunlight and temperature conditions. Applied Energy. Vol. 236, pp. 728 – 742, 2019.
- [Pare19] Parenden D., Hariyanto. Simulation of Photovoltaic Concentration with Fresnel Lens Using Simulink Matlab. European Journal of Electrical Engineering. Vol. 21, N° 2, pp. 223 – 227, 2019.
- [Pete12] Petersen K. B, Pedersen M. S. The matrix cookbook. Denmark, 2012.
- [Peti09] Petibon S. Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques. Thèse de Doctorat. Université de Toulouse, 2009.
- [Peti11a] Petit P. Optimisation du transfert d'énergie dans les systèmes photovoltaïques. Thèse de Doctorat. Université de Metz, 2011.
- [Peti12] Petit P., Aillerie M. Integration of individual DC/DC converters in a renewable energy distributed architecture. IEEE: ICIT, pp. 802 – 807, 2012.
- [Peti11b] Petit P., Zegaoui A., Sawicki J. P., Aillerie M., Charles J. P. New architecture for high efficiency DC-DC converter dedicated to photovoltaic conversion.

- Energy Procedia. Vol. 6, pp. 688 – 694, 2011.
- [Quan13] Quang M. H.
Optimisation de la production de l'électricité renouvelable pour site isolé.
Thèse de Doctorat.
Université de Reims Champagne-Ardenne, 2013.
- [Rabi07] Rabier F.
Modélisation par la méthode des plans d'expériences du comportement dynamique d'un module IGBT utilisé en traction ferroviaire.
Thèse de Doctorat.
Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.
- [Rath14] Rathod G., Gorawar M., Revankar P. P., Tewari P. G.
Matlab based comparative studies on selected mppt algorithms for spv system.
International Journal of Research in Engineering and Technology. Vol. 03, N° 07, 2014.
- [Saha11] Saha I., Jain N., Kumar S.
Using design of experiments approach to optimize custom emitter clean process used in PV.
Energy Procedia. Vol. 8, pp. 688 – 693, 2011.
- [Sahn14] Sahnoun M. A.
Contribution à la modélisation et au contrôle de trajectoire de Trackers photovoltaïques à haute concentration (HCPV).
Thèse de Doctorat.
École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2014.
- [Sahu14] Sahu T. P., Dixit T. V., Kumar R.
Simulation and Analysis of Perturb and Observe MPPT Algorithm for PV Array Using CUK converter.
Advance in Electronic and Electric Engineering. Vol. 4, N° 2, pp. 213 – 224, 2014.
- [Sapo06] Saporta G.
Probabilités et analyse des données et statistiques.
Technip. Paris, 2006.
- [Sari19] Sari-Ali I., Benyoucef B., Chikh-Bled B., Menni Y., Chamkha A.J., Lorenzini G.

- Study of Models Using One or Two Exponentials to Simulate the Characteristic Current-voltage of Silicon Solar Cells. *European Journal of Electrical Engineering*. Vol. 21, N° 3, pp. 285 – 289, 2019.
- [Sawi12] Sawicki J. P., Petit P., Zegaoui A., Aillerie M., Charles J. P. High efficiency Step-Up HVDC converter for photovoltaic generator. *Energy Procedia*. Vol. 18, pp. 1593 – 1600, 2012.
- [Schi98] Schimmerling P., Sisson J. C., Zaidi A. *Pratique des plans d'expériences*. Ed. Lavoisier Tec & Doc, 1998.
- [Schu16] Schulze Lohoff A., Kimiaie N., Blum L. The application of design of experiments and response surface methodology to the characterization of a direct methanol fuel cell stack. *International Journal of Hydrogen Energy*. Vol. 41, pp. 12222 – 12230, 2016.
- [Soro18] Soro Y. M. Tossa A. K., Yamegueu D., Sicot L. Experimental Platform for Outdoor Characterization of Photovoltaic Modules Under Hot Climate. *International Journal of Renewable Energy Research*. Vol. 8, pp. 1673 – 1684, 2018.
- [Sour12] Sourov M. R., Tania Ahmed U., Rabbani M. G. A High Performance Maximum Power Point Tracker for Photovoltaic Power System Using DC-DC Boost Converter. *IOSR Journal of Engineering*. Vol. 2, N°12, pp. 12 – 20, 2012.
- [Sury11] Surya Kumari J., Sai Babu Ch. Comparison of maximum power point tracking algorithms for photovoltaic system. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*. Vol. 1, N°5, pp. 133 – 148, 2011.
- [Tagu90] Taguchi G. *Introduction to quality engineering*. Asian Productivity Organization, Japan, 1990.
- [Taps19] Tapsoba G. R.

- Maximisation du transfert de l'énergie d'un champ photovoltaïque tenant compte du phénomène d'ombrage partiel : connexion réseau électrique.
Mémoire de Maîtrise en génie électrique. École de Technologie Supérieure.
Université du Québec, 2019.
- [Tins10] Tinsson W.
Plans d'expérience : constructions et analyses statistiques. Mathématiques et Applications 67.
Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2010.
- [Trib08] Triboulet P.
Notions de bases sur les plans d'expériences.
Lycée Niepce – Chalon sur Saône, 2008.
- [Vivi02] Vivier S.
Modélisation par la méthode des plans d'expériences du comportement dynamique d'un module IGBT utilisé en traction ferroviaire.
Thèse de Doctorat.
Université des Sciences et Technologies de Lille, 2002.
- [Walk00] Walker G.
Evaluating MPPT converter topologies using a MATLAB PV model. In Krivda, Andrej (Ed.) AUPEC: Innovation for Secure Power.
Queensland University of Technology, Brisbane, Australia, pp. 138 – 143, 2000.
- [Wann15] Wan Nurul Aiffah I., Siti Aisyah Z., Nor Fashihah Mohd N., Wan Nor Munirah Ariffin.
Experimental design and statistical analysis in Rotating Disc Contactor (RDC) column.
AIP Conference Proceedings 1691, 050010, 2015.
- [Xiao04] Xiao W., Dunford W. G. A.
Modified adaptive hill climbing MPPT method for photovoltaic power systems.
IEEE Power Electronics Specialists Conference. pp. 1957 – 1963, 2004.
- [Yahy18] Yahya-Khotbehsara A., Shahhoseini A.
A fast modeling of the double-diode model for PV modules using combined analytical and numerical approach.

- Solar Energy. Vol. 162, pp. 403 – 409, 2018.
- [Yang06] Yang Y. K., Chang T. C.
Experimental analysis and optimization of a photo resist coating process for photolithography in wafer fabrication. Microelectron Journal. Vol. 37, N° 8, pp. 746 – 751, 2006.
- [Zaim19] Zaimi M., El Achouby H., Ibral A., Assaid E. M.
Determining combined effects of solar radiation and panel junction temperature on all model-parameters to forecast peak power and photovoltaic yield of solar panel under non-standard conditions.
Solar Energy. Vol. 191, pp. 341 – 359, 2019.
- [Zega12] Zegaoui A.
Optimisation de la puissance d'un générateur photovoltaïque connecté au réseau.
Thèse de Doctorat.
Université d'Oran, 2012.
- [Zega11a] Zegaoui A., Petit P., Aillerie M., Sawicki J. P., Belarbi A. W., Krachai M. D., Charles J. P.
Photovoltaic Cell / Panel / Array Characterizations and Modeling Considering Both Reverse and Direct Modes. Energy Procedia. Vol. 6, pp. 695 – 703, 2011.
- [Zega11b] Zegaoui A., Aillerie M., Petit P., Sawicki J. P., Charles J. P., Belarbi A. W.
Dynamic behaviour of PV generator trackers under irradiation and temperature changes.
Solar Energy. Vol. 85, pp. 2953 – 2964, 2011.
- [Zega14] Zegaoui A., Allouache H., Kellal M., Arab M., Bachir G., Aillerie M.
Modeling of the Characteristics of Photovoltaic Sources Feeding a HVDC Bus.
Energy Procedia. Vol. 50, pp. 437 – 444, 2014.

LISTE DES TRAVAUX

Publications et actes de conférences

2020

1. **Kessaissia F. Z.**, Zegaoui A., Aillerie M., Arab M., Boutoubat M., Fares Ch. Factorial design and response surface optimization for modeling photovoltaic module parameters. Energy Reports. Vol. 6, pp. 299 – 309, 2020.
2. **Kessaissia F. Z.**, Zegaoui A., Taleb R., Fares Ch., Aillerie M. Design of experiments approach for modeling the electrical response of a photovoltaic module. Indonesian journal of electrical engineering and computer science. Vol 20, N° 3, 2020.
3. **Kessaissia F. Z.**, Zegaoui A., Aissa Bokhtache A., Toualbia A., Allouache H. Comparative Analysis of Two Methods of Modeling a Mono-Crystalline Silicon PV Module. Proceedings of the International Conference on Renewable Energy and Energy Conversion, Springer Nature Singapore, pp.383 – 389, 2020.

2019

4. Naama F. Z., Zegaoui A., Benyessad Y., **Kessaissia F. Z.**, Djahbar A., Aillerie M. Model and Simulation of a Wind Turbine and its Associated Permanent Magnet Synchronous Generator. Energy Procedia. Vol. 157, pp. 737 – 745, 2019.

2018

5. **Kessaissia F. Z.**, Zegaoui A., Boutoubat M., Allouache H., Aillerie M., Charles J.-P. The DoE method as an efficient tool for modeling the behavior of mono-crystalline Si-PV module. Proceedings of the International Conference on Technology and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, 1968, 030059-1 – 030059-10, 2018. Doi: 10.1063/1.5039246
6. Zegaoui A., Boutoubat M., J. -P. Sawicki, **Kessaissia F. Z.**, Djahbar A., Aillerie M. Enhanced model of photovoltaic cell/panel/array considering the direct and reverse modes.

Proceedings of the International Conference on Technology and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, 1968, 030015-1 – 030015-6, 2018. Doi: 10.1063/1.5039202

7. Allouache H., Zegaoui A., Boutoubat M., Aissa Bokhtache A., **Kessaissia F. Z.**, Charles J. -P, Aillerie M.
Distributed photovoltaic architecture powering a DC bus: Impact of duty cycle and load variations on the efficiency of the generator.
Proceedings of the International Conference on Technology and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, 1968, 030006-1 – 030006-10, 2018. Doi: 10.1063/1.5039193

2017

8. Hemici K., Zegaoui A., Djahbar A., Aissa Bokhtache A., **Kessaissia F. Z.**, Allouache H., Mahmoudi M., Aillerie M.
Sliding mode control for a three phase multicell inverter dedicated to renewable energy systems.
Proceeding of the International Conference on Technology and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, 1814, 020061-1 – 020061-9, 2017. Doi: 10.1063/1.4976280
9. Aissa Bokhtache A., Zegaoui A., Djahbar A., Aillerie M., **Kessaissia F. Z.**, Allouache H., Bouchrit M. S.
Power supply improvements for ballasts-low pressure mercury/argon discharge lamp for water purification.
Proceeding of the International Conference on Technology and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability,, 1814, 020059-1 – 020059-8, 2017. Doi: 10.1063/1.4976278

2015

10. **Kessaissia F. Z.**, Zegaoui A., Hadj Arab A., Loukarfi L., Aillerie M.
Comparison of Two PV modules Technologies Using Analytical and Experimental Methods.
Energy Procedia. Vol. 74, pp. 389 – 397, 2015.

Communications Internationales

ICAME'19, 5th International Conference on advances in mechanical engineering, Istanbul, December 17-19, 2019

1. **Kessaissia F. Z.**, Zegaoui A., Tualbia A., Aissa Bokhtache A.

- Communication écrite** « A new concept of modeling a photovoltaic module behavior ».
2. Toualbia A., Aissa Bokhtache A., **Kessaissia F. Z.**, Zegaoui A.
Communication écrite « A new robust control of thermoelectric system ».
 3. Toualbia A., Aissa Bokhtache A., **Kessaissia F. Z.**, Zegaoui A.
Communication écrite « Comparison of MPPT strategies for photovoltaic system».
 4. Aissa Bokhtache A., Toualbia A., **Kessaissia F. Z.**, Hemici K., Zegaoui A.
Communication écrite « Dynamic behavior of a discharge lamp-electronic ballast system for sterilization ».
 5. Aissa Bokhtache A., Toualbia A., **Kessaissia F. Z.**, Hemici K., Zegaoui A.
Communication écrite « optimization of a power supply used for a discharge lamp-electronic ballast system for sterilization using conventional converter and a matrix converter ».

ICMSE'19, International Conference on Materials Science and Engineering and their impact on the Environment, Sidi Bel Abbes, 26 – 28 November, 2019

6. Aissa Bokhtache A., Hemici K., Toualbia A., **Kessaissia F. Z.**, Allouache H., Bouchrit M. S.
Communication écrite « Comparative study between two ballasts supplying low-pressure mercury - argon discharge lamp for water purification ».

ICREEC'19, 1st International Conference on Renewable Energy and Energy Conversion, USTO-MB Oran, Algeria 11-13 November 2019

7. **Kessaissia F. Z.**, Zegaoui A., Aissa Bokhtache A., Toualbia A., Allouache H.
Communication orale « Comparative Analysis of Two Methods of Modeling a Mono-Crystalline Silicon PV Module ».
8. Toualbia A., Tadjine M., Aissa Bokhtache A., **Kessaissia F. Z.**
Communication écrite « Comparative study of MPPT for thermoelectric system implementing passivity controller ».
9. Aissa Bokhtache A., Toualbia A., **Kessaissia F. Z.**, Hemici K., Zegaoui A., Bouchrit M. S., Aillerie M.
Communication orale « Supply of a system "Matrix converter-Low pressure mercury-Argon discharge lamp" for the sterilization of finished products ».

ICMEMIS'19, 1st International Conference on Materials, Environment, mechanical and Industrial system, Djelfa, Algeria 29-30 June 2019

10. Aissa Bokhtache A., Hemici K., **Kessaissia F. Z.**, Zegaoui A., Toualbia A., Bouchrit M. S.
Communication écrite « A Design of a High Frequency Power Supply (Electronic Ballast Based on Multicellular 4-Cell Converter) to Supply a UVC Lamp for Water Sterilization ».

TMREES'18, International Conference on Technology and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, Athens-Greece, September 19-21, 2018

11. Naama F. Z., Zegaoui A., Benyessad Y., **Kessaissia F. Z.**, Djahbar A., Aillerie M.
Communication écrite « Model and Simulation of a Wind Turbine and its Associated Permanent Magnet Synchronous Generator ».

TMREES'18, International Conference on Technology and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, Beirut-Lebanon, February 01-03, 2018

12. **Kessaissia F. Z.**, Zegaoui A., Boutoubat M., Allouache H., Aillerie M., Charles J.-P.
Communication écrite « The DoE method as an efficient tool for modeling the behavior of mono-crystalline Si-PV module ».

13. Zegaoui A., Boutoubat M., J. -P. Sawicki, **Kessaissia F. Z.**, Djahbar A., Aillerie M.
Communication écrite « Enhanced model of photovoltaic cell/panel/array considering the direct and reverse modes ».

14. Allouache H., Zegaoui A., Boutoubat M., Aissa Bokhtache A., **Kessaissia F. Z.**, Charles J. -P, Aillerie M.
Communication écrite « Distributed photovoltaic architecture powering a DC bus: Impact of duty cycle and load variations on the efficiency of the generator ».

ICATS'17, International Conference on Automatic Control Telecommunications and Signals, Annaba, Algeria 11-12 December 2017

15. Aissa Bokhtache A., Bouchrit M. S., Hemici K., Zegaoui A., Toualbia A., **Kessaissia F. Z.**
Communication écrite « Control of a Discharge lamp- Electronic ballast system using half bridge inverter for water purification ».

TMREES'16, International Conference on Technology and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, Paris-France, November 16 -18, 2016

16. Hemici K., Zegaoui A., Djahbar A., Aissa Bokhtache A., **Kessaissia F. Z.**, Allouache H., Mahmoudi M., Aillerie M.

Communication écrite « Sliding mode control for a three phase multicell inverter dedicated to renewable energy systems ».

17. Aissa Bokhtache A., Zegaoui A., Djahbar A., Aillerie M., **Kessaissia F. Z.**, Allouache H., Bouchrit M. S.

Communication écrite « Power supply improvements for ballasts-low pressure mercury/argon discharge lamp for water purification ».

TMREES'15, International Conference on Technology and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability, Beirut-Lebanon, April 17-20, 2015

18. **Kessaissia F. Z.**, Zegaoui A., Hadj Arab A., Loukarfi L.

Communication écrite « Characterization of two different technologies photovoltaic modules ».

Communications nationales

2019

1. **Kessaissia F. Z.**, Zegaoui A., Allouache H., Aillerie M.
Characterization and modeling of PV Generators using DoE Method.
The First Doctoral symposium on Technology: Process, Mechanical and Electrical Engineering, DST'01-2019 Chlef, November 13-14, 2019.

ANNEXES

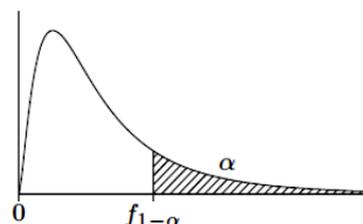
Annexe 1

Loi de Fisher-Snedecor

Si F est une variable aléatoire suivant la loi de Fisher-Snedecor à (ν_1, ν_2) degrés de liberté, la table donne la valeur $f_{1-\alpha}$ telle que

$$\mathbb{P}\{F \geq f_{1-\alpha}\} = \alpha = 0,05.$$

Ainsi, $f_{1-\alpha}$ est le quantile d'ordre $1 - \alpha = 0,95$ de la loi de Fisher-Snedecor à (ν_1, ν_2) degrés de liberté.



$\nu_2 \backslash \nu_1$	1	2	3	4	5	6	8	10	15	20	30	∞
1	161	200	216	225	230	234	239	242	246	248	250	254
2	18,5	19,0	19,2	19,2	19,3	19,3	19,4	19,4	19,4	19,4	19,5	19,5
3	10,1	9,55	9,28	9,12	9,01	8,94	8,85	8,79	8,70	8,66	8,62	8,53
4	7,71	6,94	6,59	6,39	6,26	6,16	6,04	5,96	5,86	5,80	5,75	5,63
5	6,61	5,79	5,41	5,19	5,05	4,95	4,82	4,74	4,62	4,56	4,50	4,36
6	5,99	5,14	4,76	4,53	4,39	4,28	4,15	4,06	3,94	3,87	3,81	3,67
7	5,59	4,74	4,35	4,12	3,97	3,87	3,73	3,64	3,51	3,44	3,38	3,23
8	5,32	4,46	4,07	3,84	3,69	3,58	3,44	3,35	3,22	3,15	3,08	2,93
9	5,12	4,26	3,86	3,63	3,48	3,37	3,23	3,14	3,01	2,94	2,86	2,71
10	4,96	4,10	3,71	3,48	3,33	3,22	3,07	2,98	2,85	2,77	2,70	2,54
11	4,84	3,98	3,59	3,36	3,20	3,09	2,95	2,85	2,72	2,65	2,57	2,40
12	4,75	3,89	3,49	3,26	3,11	3,00	2,85	2,75	2,62	2,54	2,47	2,30
13	4,67	3,81	3,41	3,18	3,03	2,92	2,77	2,67	2,53	2,46	2,38	2,21
14	4,60	3,74	3,34	3,11	2,96	2,85	2,70	2,60	2,46	2,39	2,31	2,13
15	4,54	3,68	3,29	3,06	2,90	2,79	2,64	2,54	2,40	2,33	2,25	2,07
16	4,49	3,63	3,24	3,01	2,85	2,74	2,59	2,49	2,35	2,28	2,19	2,01
17	4,45	3,59	3,20	2,96	2,81	2,70	2,55	2,45	2,31	2,23	2,15	1,96
18	4,41	3,55	3,16	2,93	2,77	2,66	2,51	2,41	2,27	2,19	2,11	1,92
19	4,38	3,52	3,13	2,90	2,74	2,63	2,48	2,38	2,23	2,16	2,07	1,88
20	4,35	3,49	3,10	2,87	2,71	2,60	2,45	2,35	2,20	2,12	2,04	1,84
22	4,30	3,44	3,05	2,82	2,66	2,55	2,40	2,30	2,15	2,07	1,98	1,78
24	4,26	3,40	3,01	2,78	2,62	2,51	2,36	2,25	2,11	2,03	1,94	1,73
26	4,23	3,37	2,98	2,74	2,59	2,47	2,32	2,22	2,07	1,99	1,90	1,69
28	4,20	3,34	2,95	2,71	2,56	2,45	2,29	2,19	2,04	1,96	1,87	1,65
30	4,17	3,32	2,92	2,69	2,53	2,42	2,27	2,16	2,01	1,93	1,84	1,62
40	4,08	3,23	2,84	2,61	2,45	2,34	2,18	2,08	1,92	1,84	1,74	1,51
50	4,03	3,18	2,79	2,56	2,40	2,29	2,13	2,03	1,87	1,78	1,69	1,44
60	4,00	3,15	2,76	2,53	2,37	2,25	2,10	1,99	1,84	1,75	1,65	1,39
80	3,96	3,11	2,72	2,49	2,33	2,21	2,06	1,95	1,79	1,70	1,60	1,32
100	3,94	3,09	2,70	2,46	2,31	2,19	2,03	1,93	1,77	1,68	1,57	1,28
∞	3,84	3,00	2,60	2,37	2,21	2,10	1,94	1,83	1,67	1,57	1,46	1,00

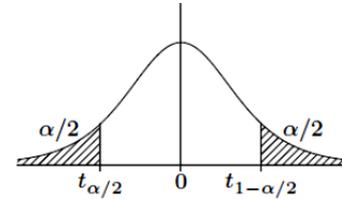
Annexe 2

Loi de Student

Si T est une variable aléatoire suivant la loi de Student à ν degrés de liberté, la table donne, pour α fixé, la valeur $t_{1-\alpha/2}$ telle que

$$\mathbb{P}\{|T| \geq t_{1-\alpha/2}\} = \alpha.$$

Ainsi, $t_{1-\alpha/2}$ est le quantile d'ordre $1 - \alpha/2$ de la loi de Student à ν degrés de liberté.



$\nu \backslash \alpha$	0,900	0,500	0,300	0,200	0,100	0,050	0,020	0,010	0,001
1	0,1584	1,0000	1,9626	3,0777	6,3138	12,7062	31,8205	63,6567	636,6193
2	0,1421	0,8165	1,3862	1,8856	2,9200	4,3027	6,9646	9,9248	31,5991
3	0,1366	0,7649	1,2498	1,6377	2,3534	3,1824	4,5407	5,8409	12,9240
4	0,1338	0,7407	1,1896	1,5332	2,1318	2,7764	3,7469	4,6041	8,6103
5	0,1322	0,7267	1,1558	1,4759	2,0150	2,5706	3,3649	4,0321	6,8688
6	0,1311	0,7176	1,1342	1,4398	1,9432	2,4469	3,1427	3,7074	5,9588
7	0,1303	0,7111	1,1192	1,4149	1,8946	2,3646	2,9980	3,4995	5,4079
8	0,1297	0,7064	1,1081	1,3968	1,8595	2,3060	2,8965	3,3554	5,0413
9	0,1293	0,7027	1,0997	1,3830	1,8331	2,2622	2,8214	3,2498	4,7809
10	0,1289	0,6998	1,0931	1,3722	1,8125	2,2281	2,7638	3,1693	4,5869
11	0,1286	0,6974	1,0877	1,3634	1,7959	2,2010	2,7181	3,1058	4,4370
12	0,1283	0,6955	1,0832	1,3562	1,7823	2,1788	2,6810	3,0545	4,3178
13	0,1281	0,6938	1,0795	1,3502	1,7709	2,1604	2,6503	3,0123	4,2208
14	0,1280	0,6924	1,0763	1,3450	1,7613	2,1448	2,6245	2,9768	4,1405
15	0,1278	0,6912	1,0735	1,3406	1,7531	2,1314	2,6025	2,9467	4,0728
16	0,1277	0,6901	1,0711	1,3368	1,7459	2,1199	2,5835	2,9208	4,0150
17	0,1276	0,6892	1,0690	1,3334	1,7396	2,1098	2,5669	2,8982	3,9651
18	0,1274	0,6884	1,0672	1,3304	1,7341	2,1009	2,5524	2,8784	3,9216
19	0,1274	0,6876	1,0655	1,3277	1,7291	2,0930	2,5395	2,8609	3,8834
20	0,1273	0,6870	1,0640	1,3253	1,7247	2,0860	2,5280	2,8453	3,8495
21	0,1272	0,6864	1,0627	1,3232	1,7207	2,0796	2,5176	2,8314	3,8193
22	0,1271	0,6858	1,0614	1,3212	1,7171	2,0739	2,5083	2,8188	3,7921
23	0,1271	0,6853	1,0603	1,3195	1,7139	2,0687	2,4999	2,8073	3,7676
24	0,1270	0,6848	1,0593	1,3178	1,7109	2,0639	2,4922	2,7969	3,7454
25	0,1269	0,6844	1,0584	1,3163	1,7081	2,0595	2,4851	2,7874	3,7251
26	0,1269	0,6840	1,0575	1,3150	1,7056	2,0555	2,4786	2,7787	3,7066
27	0,1268	0,6837	1,0567	1,3137	1,7033	2,0518	2,4727	2,7707	3,6896
28	0,1268	0,6834	1,0560	1,3125	1,7011	2,0484	2,4671	2,7633	3,6739
29	0,1268	0,6830	1,0553	1,3114	1,6991	2,0452	2,4620	2,7564	3,6594
30	0,1267	0,6828	1,0547	1,3104	1,6973	2,0423	2,4573	2,7500	3,6460
40	0,1265	0,6807	1,0500	1,3031	1,6839	2,0211	2,4233	2,7045	3,5510
60	0,1262	0,6786	1,0455	1,2958	1,6706	2,0003	2,3901	2,6603	3,4602
80	0,1261	0,6776	1,0432	1,2922	1,6641	1,9901	2,3739	2,6387	3,4163
120	0,1259	0,6765	1,0409	1,2886	1,6577	1,9799	2,3578	2,6174	3,3735
∞	0,1257	0,6745	1,0364	1,2816	1,6449	1,9600	2,3263	2,5758	3,2905

Lorsque $\nu = \infty$, $t_{1-\alpha/2}$ est le quantile d'ordre $1 - \alpha/2$ de la loi normale $\mathcal{N}(0, 1)$.