

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Automatique
Laboratoire de Commande des Processus

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme
D'Ingénieur d'Etat en Automatique

Etude et commande d'un convertisseur DC/DC à base d'un microcontrôleur. Application à un système photovoltaïque.

Présenté par
Aissa STATRA
Omar BEN MEBAREK

Sous la direction de:
Pr. E.BERKOUK
Mr : F.AKEL

Présenté et soutenu publiquement le 23 juin 2018

Composition du Jury:

Président : Pr. M.S BOUCHERIT professeur à l'ENP
Promoteurs : Pr. E.BERKOUK, Professeur à l'ENP
Mr : F.AKEL (MRB UDES)
Examineur : Dr. H.ACHOUR professeur à l'ENP

ENP 2018

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département d'Automatique
Laboratoire de Commande des Processus

Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme
D'Ingénieur d'Etat en Automatique

Etude et commande d'un convertisseur DC/DC à base d'un microcontrôleur. Application à un système photovoltaïque.

Présenté par
Aissa STATRA
Omar BEN MEBAREK

Sous la direction de:
Pr. E.BERKOUK
Mr : F.AKEL

Présenté et soutenu publiquement le 23 juin 2018

Composition du Jury:

Président : Pr. M.S BOUCHERIT professeur à l'ENP
Promoteurs : Pr. E.BERKOUK, Professeur à l'ENP
Mr : F.AKEL (MRB UDES)
Examineur : Dr. H.ACHOUR professeur à l'ENP

ENP 2018

الحمد لله رب العالمين
والصلاة والسلام على رسول الله.
”وقل رب زدني علما“ طه 114

« L'imagination est plus importante que le savoir »

« La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi »

Albert EINSTEIN

ملخص

في هذا المشروع, درسنا وانجزنا أحد أنظمة الطاقة الشمسية. الدراسة كانت حول تصميم والتحكم و دمج المحولات في هذا النظام, والمكون من نظام تخزين يرتكز على مدخرة ومحولات تيار مستمر ومحول تيار متناوب ومولد كهروضوئي. كما أجرينا دراسة نظرية باستغلال ماطلاب/سيميلنك. تقنية م.ب.ب.ت تستعمل للحصول على السير الأمثل للمولد الكهروضوئي. كما أنشأنا خوارزمية للتحكم في الطاقة بين مختلف مقاطع النظام. أجريت تطبيق تجريبي باستغلال بطاقة الاردوينو دوي. الهدف الأول من هذا المشروع كان انجاز محول تيار مسمر (مضخم و مضخم-مقلص). نجحنا في تطبيق تقنية م.ب.ب.ت و المعدل ب.إ. و خوارزمية س.ف.م باستغلال مقياس الاردوينو ب.و.م.

الكلمات المفتاحية : تقنية م.ب.ب.ت, محول تيار مستمر, التعديل الشعاعي, محول تيار متناوب بمستويين, مقياس ب.و.م, بطاقة أردوينو, معدل ب.إ.

Abstract

In this work, we studied and realized an autonomous photovoltaic system. The studies were carried out on modeling, control and integration of converters in this system, consisting of a battery-based storage system, a photovoltaic generator, DC / DC converters and a two-level inverter. A theoretical study was done using the MATLAB / SIMULINK tool. The MPPT technique is used to have optimal GPV power operation. Again we presented a global energy management algorithm where we manage the energy involved between the different system stages. A real-time implementation was performed using the ARDUINO DUE card. The main contribution of this project is that we realized Boost and Buck-Boost converters. Then we managed to implement the MPPT technique, the PI regulator and the SVM algorithm by exploiting the PWM module of the ARDUINO DUE board.

Keywords: MPPT technique, Booster chopper, Vector modulation (SVM), Two-level inverter, PWM module, ARDUINO DUE board, PI controller.

Résumé

Dans ce travail, on a étudié et réalisé un système photovoltaïque autonome. Les études ont été réalisées sur la modélisation, le contrôle et l'intégration des convertisseurs dans ce système, composé d'un système de stockage à base de batteries, un générateur photovoltaïque, des convertisseurs DC/DC et un onduleur deux niveaux. Une étude théorique a été faite grâce à l'outil MATLAB/SIMULINK. La technique MPPT est utilisée pour avoir un fonctionnement optimal en puissance du GPV. Encore on a présenté un algorithme de gestion d'énergie globale où on gère l'énergie mise en jeu entre les différents étages de système. Une implémentation temps réel a été réalisée en utilisant la carte ARDUINO DUE. L'apport principal de ce projet est qu'on a réalisé les convertisseurs Boost et Buck-Boost. Ensuite on a réussi à implémenter la technique MPPT, le régulateur PI et l'algorithme SVM en exploitant le module PWM de la carte ARDUINO DUE.

Mots-clés : Technique MPPT, Hacheur survolteur, Modulation vectorielle (SVM), Onduleur à deux niveaux, Module PWM, La carte ARDUINO DUE, Le régulateur PI.

Remerciements

Avant tout nous remercions Dieu Le tout puissant de nous avoir donné ce courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces années et qui grâce à lui ce travail a pu être réalisé.

Tout d'abord Nous tenons à exprimer aussi nos vives gratitudee à nos promoteurs **Pr. EM. BERKOUK** pour avoir proposé ce sujet, sa patience, son aide illimitée tout au long de notre travail, ses conseils très riches et aussi pour son amabilité.

Nous tenons à remercier Monsieur **AKEL Fethi** de l'unité développement des énergies renouvelables à Bou Ismail , de nous avoir assuré les meilleures conditions de travail au niveau pédagogique ainsi que les moyens matériels pour le bon déroulement de notre projet.

Toute notre reconnaissance et nos remerciements les plus vifs s'adressent au Président et aux membres de jury de nous avoir honorés en acceptant de juger et d'évaluer notre travail.

Nous tenons à remercier aussi tous les enseignants du département Automatique qui sont à l'origine de tout notre savoir et connaissance.

Nous remercions aussi les doctorants de LCP Automatique à l'**Ecole Nationale Polytechnique** spécialement et très chaleureusement **Mme BAHLOULI Asma**.

Nous tenons aussi à remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin au bon déroulement et la finalisation de notre projet.

Dédicaces

Je dédie ce travail

A ma mère la femme qui m'aime le plus dans le monde.

*A mon père, rien au monde ne vaut les efforts fournis
jours et nuits pour mon éducation.*

Mes frères : Youcef et Yazid.

*Mes sœurs : Samah, Abla et son époux Jamel sans oublier leurs
enfants : Ziad, Yacine et la petite Amina.*

A mon ami et binôme Omar.

A tous mes amis et camarades

A toute ma famille : mes tantes et mes oncles

A tous mes enseignants

A tous ceux qui sont chers

Aissa

Dédicaces

Je dédie ce travail à ma mère et mon père qui m'ont toujours encouragé dans mes études sans répit et avec beaucoup de responsabilités.

Je le dédie aussi à mes frères et sœurs et sans oublier mes neveux, pour leur soutien continu et l'ambiance familiale et reposante, qui m'a beaucoup aidé pour la concrétisation de mon mémoire de fin d'études.

Je le dédie aussi à mon ami et binôme Aissa et à tous mes amis qui m'ont supporté, dans tous mes changements d'humeur pendant le déroulement de mes études.

Omar

Table des matières

LISTE DES TABLEAUX

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION GENERALE.....	16
CHAPITRE 01 : ETAT DE L'ART SUR LES SYSTEME PV	18
Introduction	19
1.1. L'énergie solaire :.....	19
1.1.1. Caractéristique du rayonnement solaire :	19
1.1.2. Normalisation :.....	21
1.1.3. Les inconvénients de l'énergie solaire :	21
1.1.4. Les avantages de l'énergie solaire :.....	21
1.2. Conversion de l'énergie solaire :.....	21
1.2.1. La cellule photovoltaïque :.....	21
1.2.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :	22
1.3. Les types des générateurs PV :	22
1.3.1. Silicium monocristallin	22
1.3.1.1. Avantage :.....	23
1.3.1.2. Inconvénients :.....	23
1.3.2. Silicium poly cristallin (multi cristallin)	23
1.3.2.1. Les avantages :.....	23
1.3.2.2. Les inconvénients :.....	23
1.3.3. Silicium amorphe	23
1.3.3.1. Les avantages :.....	24
1.3.3.2. Les inconvénients :.....	24
1.4. Groupement des cellules PV :	24
1.4.1. Association série :.....	24
1.4.2. Association parallèle :	24
1.5. Applications des systèmes PV :	24
1.5.1. Système connecté au réseau :.....	25
1.5.2. Système autonome :	25
Conclusion.....	26
CHAPITRE 02 : MODELISATION ET DIMENSIONNEMENT DES ORGANES DE LA CHAINE PV	27

Introduction :	28
2.1. Description de La chaine PV :	28
2.2. Le modèle du générateur photovoltaïque [4]:	29
2.2.1. La caractéristique I-U du PV :	30
2.3. Dispositif de stockage :	32
2.3.1. Rôles de la batterie :	33
2.3.2. Construction et principe de fonctionnement [30]:	33
2.4. Convertisseur DC-DC :	35
2.4.1. Le hacheur Survolteur (BOOST) :	36
2.4.2. Hacheur survolteur-dévolteur (BUCK-BOOST) :	37
2.5. Dimensionnement des éléments passifs des hacheurs et du bus continu:	39
2.5.1. Ondulation du courant et de la tension :	40
2.5.1.1. Ondulation du courant :	40
2.5.1.2. Ondulation de la tension	40
2.6. Convertisseur DC-AC :	41
2.6.1. Présentation de L'onduleur :	42
2.6.2. Description et fonctionnement de l'onduleur triphasé :	42
2.6.3. Modélisation vectorielle de l'onduleur :	42
2.7. Modélisation et dimensionnement des éléments passifs du filtre de sortie de l'onduleur :	44
Conclusion :	46
CHAPITRE 03 : COMMANDE ET SIMULATION DE LA CHAINE PV.....	49
Introduction :	48
3.1. Commande de l'étage d'adaptation (Boost).....	48
3.1.1. La Commande MPPT (Maximum Point Power Tracker):	48
3.1.1.1. Méthode de perturbation et d'observation (P&O) :	48
3.1.1.2. Méthode D'incrémentation de la conductance IC :	50
3.1.2. Résultats de la simulation :	51
3.1.3. Interprétation des résultats:	53
3.2. Commande de l'étage d'adaptation (Buck-Boost).....	53
3.2.1. La commande par PI :	53
3.2.1.1. Synthèse du régulateur:	54
3.2.1.2. Résultats de la simulation :	54
3.2.2. La commande par mode glissant :	55
3.2.2.1. Attractivité, Existence et Stabilité :	56
3.2.2.2. Synthèse de la commande par mode glissant.....	57
3.2.2.3. Choix de la surface de glissement :	57
3.2.2.3. Résultats de la simulation :	58
3.2.2.4. Interprétations des résultats:	58

3.3.	Commande de l'onduleur de tension triphasé	58
3.3.1.	Commande par MLI-sinusoidale.....	59
3.3.1.1.	Principe de la commande par la MLI sinusoidale de l'onduleur triphasé :	59
3.3.1.2.	Commande par la MLI sinusoidale de l'onduleur triphasé :	59
3.3.1.3.	Résultats de la simulation :	60
3.3.2.	La MLI sinusoidale avec l'injection de la troisième harmonique :	62
3.3.2.1.	Courbe de réglage :.....	62
3.3.2.2.	Injection du 3ième harmonique.....	62
3.3.2.3.	Résultats de simulation :	63
3.3.3.	La commande par MLI vectorielle (SVM) :	65
3.3.3.1.	Transformation triphasée biphasée	66
3.3.3.2.	Algorithme de la SVM d'un onduleur	67
3.3.3.3.	Les temps d'application des états de l'onduleur :	67
3.3.3.4.	Détermination des séries d'impulsions pour chaque bras de l'onduleur :	67
3.3.3.5.	Résultats de la simulation :	68
3.4.	Gestion d'énergie :	71
	Introduction	71
3.4.2.	Puissance limitée	73
3.4.3.	Gestion d'énergie des charges :.....	74
3.4.4.	Simulation de tous les cas :	77
	Conclusion :	78
 CHAPITRE 04 : ETUDE EXPERIMENTALE		79
	Introduction	80
4.1.	Description du banc d'essai :	80
4.2.	L'émulateur PV :	81
4.2.1.	Modélisation et fonctionnement.....	81
4.2.2.	Automatique, basée sur les paramètres du réseau solaire.....	82
4.2.3.	Automatique, basé sur 4 paramètres	82
4.2.4.	Manuel	82
4.3.	Le hacheur Boost.....	83
4.3.1.	Circuit de puissance :	83
4.3.1.1.	IGBT (K40T1202) :.....	84
4.3.1.2.	Diode:	84
4.3.2.	Circuit de commande :	85
4.3.3.	Mesures et instruments :	86
4.3.3.1.	Cartes de mesures de tensions et de courants :	86
4.3.3.2.	Capteur du courant LA25-P:.....	86
4.3.3.3.	Capteur de la tension LV25-P:	87
4.3.3.4.	Alimentation stabilisé et l'oscilloscope :	88
4.3.4.	L'inductance :	88
4.4.	La charge résistive:.....	89

4.5.	Résultats expérimentaux :	89
4.5.1.	Le signal de commande délivrer par HCPL / Arduino :	89
4.5.2.	Test de circuit de puissance (Hacheur Boost) :	90
4.5.3.	Implémentation de l'Algorithme MPPT :	90
4.6.	L'onduleur :	93
4.6.1.	Le Filtre LC :	94
4.6.2.	Résultats expérimentaux :	95
4.6.2.1.	Retard entre deux signaux complémentaires :	95
4.6.2.2.	Implémentation de l'algorithme SVM :	95
4.7.	Le hacheur Buck-boost :	101
4.7.1.	Bus continu :	101
4.7.2.	Circuit de commande :	101
4.8.	Les batteries :	102
4.9.	Résultats expérimentaux :	102
4.10.	Implémentation du régulateur PI :	104
	Remarque :7	105
	Conclusion :	105
	BIBLIOGRAPHIE	107
	ANNEXE A	109
	ANNEXE B : [HOMER]	113
	ANNEXE C [ARDUINO]	120

Liste des tableaux

Tableau 2.1 : les vecteurs de tension pour les huit états de l'onduleur	44
Tableau 3.1 : Vecteurs de l'onduleur à deux niveaux dans le repère (α, β)	66
Tableau 4.1 : Caractéristique d'IGBT.....	86
Tableau 4.2 : Caractéristique de la diode	86
Tableau 4.3 : Les paramètres du PV.....	93

Liste des figures

Figure 1.1 : La Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle.....	14
Figure 1.2 : Le spectre standard de la lumière du soleil.....	14
Figure 1.3 : La Jonction P-N dans une cellule.....	16
Figure 1.4 : Cellule –Module–Panneau.....	16
Figure 1.5 : La cellule monocristalline.....	17
Figure 1.6 : La cellule poly cristalline.....	18
Figure 1.7 : La cellule amorphe.....	18
Figure 1.9 : Système photovoltaïque autonome.....	20
Figure 1.10 : La structure en cascade.....	20
Figure 1.11 : La structure a bus continue commun.....	20
Figure 2.1 : Le système étudié et réalisé.....	22
Figure 2.2 : Le modèle à diode du générateur photovoltaïque.....	23
Figure 2.5 : La variation de I-U et P-U en fonction de l'irradiation.....	26
Figure 2.6 : La variation d'U-I et P-U en fonction de la température.....	26
Figure 2.7 : Le modèle électrique de la batterie.....	28
Figure 2.8 : Le hacheur Survolteur (BOOST).....	30
Figure 2.9 : Le hacheur Survolteur (BOOST) dans la phase de fonctionnement $[0, \alpha T]$	30
Figure 2.10 : Le hacheur Survolteur (BOOST) dans la phase de fonctionnement $[\alpha T, T]$	30
Figure 2.11 : Hacheur réversible en courant associé aux batteries.....	31
Figure 2.12 : Etat de la charge.....	32
Figure 2.13 : Etat de la décharge.....	32
Figure 2.14 : Allure des signaux du hacheur survolteur en condition continue.....	34
Figure 2.15 : Onduleur MLI triphasé de tension.....	36
Figure 2.16 : L'onduleur avec le filtre LC et la charge triphasé.....	38
Figure 2.18 : Diagramme de Bode de système du second ordre $f = 50HZ$ avec $\zeta = 0.7$	39
Figure 3.1 : Caractéristique $[P_{pv} - V_{pv}]$ d'un panneau photovoltaïque pour une irradiation fixe et une température constante.....	34
Figure 3.2 : L'organigramme de l'algorithme P&O.....	34
Figure 3.3 : L'organigramme de l'algorithme IC.....	36
Figure 3.4 : Modèle sous SIMULINK du panneau photovoltaïque.....	37
Figure 3.5 : Evolution de profil de l'éclairement (en W/m^2) du PV « signal Builder ».....	37
Figure 3.7 : Evolution de la tension du PV.....	37
Figure 3.6 : Evolution du courant du PV.....	38
Figure 3.8 : Evolution de la puissance (en W) du générateur PV.....	38
Figure 3.9 : Evolution de la tension du bus continu (en V).....	38
Figure 3.10 : Evolution de la puissance consommée par la charge (en W).....	38
Figure 3.11 : La tension du bus continu.....	41
Figure 3.12 : Le courant de la batterie (en A).....	41
Figure 3.13 : La tension de la batterie(V).....	41
Figure 3.14 : L'état de charge de la batterie (A).....	41
Figure 3.16 : Le courant de la batterie.....	44
Figure 3.17 : La tension du bus continu (en V).....	44
Figure 3.18 : La tension de la batterie (V).....	44
Figure 3.19 : L'état de charge de la batterie (en %).....	44
Figure 3.20 : Les signaux de commande de la MLI sinusoïdale triphasé.....	46
Figure 3.21 : Les tensions de références et la porteuse ($r=0.8$).....	47
Figure 3.22 : La MLI sinusoïdale –la commande S1 et son complémentaire S4.....	47
Figure 3.23 : La tension de sortie du bras (01) V_{1M}	48

Figure 3.24 : La tension composé U_{12}	48
Figure 3.25 : La tension simple V_{1N}	49
Figure 3.26: Les tensions simples V_{1N} , V_{2N} et V_{3N} après filtrage.....	49
Figure 3.27: Variation de V_1 en fonction de r	49
Figure 3.28 : La tension de référence (1) avec la porteuse et le 3 ^{ième} harmonique.....	50
Figure 3.29: Les tensions de références avec la porteuse ($r = 0.8$).....	51
Figure 3.31 : La tension de sortie du (01) bras V_{1M}	52
Figure 3.32 : La tension composé U_{12}	52
Figure 3.31 : La tension de sortie du (01) bras V_{1M}	52
Figure 3.34 : Les tensions simples V_{1N} , V_{2N} et V_{3N} après filtrage.....	52
Figure 3.35: Représentation des 8 états de l'onduleur dans le repère (α, β) , et les différents secteurs.....	53
Figure 3.36 : Signaux de commande pour chaque secteur.....	56
Figure 3.37: Les signaux de commande S_1 , S_2 et S_3	56
Figure 3.38 : Les secteurs 6 et 1.....	57
Figure 3.39: Les secteurs 2 et 3.....	57
Figure 3.40: Les secteurs 4 et 5.....	58
Figure 3.41: Le signal de sortie de (01) bras V_{1M}	58
Figure 3.42: La tension composé U_{12}	59
Figure 3.43: La tension simple V_{1N}	59
Figure 3.45 : le courant de l'inductance I_L (avant filtrage).....	60
Figure 3.46 : Les courants de charge I_{ch} filtré.....	60
Figure 3.47 : La commande complète du hacheur.....	63
Figure 3.48 : L'irradiation (en W/m^2).....	63
Figure 3.49 : L'état de charge de la batterie (en %).....	63
Figure 3.50 : La tension du bus continu (V).....	63
Figure 3.51 : Le courant de la batterie (A).....	63
Figure 3.52 : La puissance produite par le PV (en W).....	64
Figure 3.53 : L'irradiation (en W/m^2).....	65
Figure 3.54 : L'état de charge de la batterie (en %).....	65
Figure 3.55 : La tension du bus continu (V).....	65
Figure 3.56 : Le courant de la batterie (A).....	65
Figure 3.57: La puissance produite par le PV (en W).....	66
Figure 3.58: L'irradiation (en W/m^2).....	66
Figure 3.59 : L'état de charge de la batterie (en %).....	66
Figure 3.60 : La tension du bus continu (V).....	67
Figure 3.61 : Le courant de la batterie (A).....	67
Figure 3.62 : La puissance produite par le PV (en W).....	67
Figure 3.63: L'irradiation (en W/m^2).....	68
Figure 3.64 : L'état de charge de la batterie (en %).....	68
Figure 3.65 : La tension du bus continu (V).....	69
Figure 3.66 : le courant de la batterie (A).....	69
Figure 3.67 : La puissance produite par le PV (en W).....	69
Figure 4.1 : La plateforme expérimentale.....	65
Figure 4.2 : L'émulateur PV (Magna Power Electronics 600V / 24A).....	66
Figure 4.3 : L'interface de l'émulateur PV.....	68
Figure 4.4 : Le hacheur survolteur.....	69
Figure 4.5 : Circuit de commande.....	71
Figure 4.6 : Schéma de circuit de commande.....	72
Figure 4.7 : Le capteur de courant.....	72
Figure 4.8 : Schéma du montage de capteur.....	73

Figure 4.9 : Le capteur de la tension.....	73
Figure 4.10 : Schéma du montage de capteur de la tension.....	74
Figure 4.11 : Alimentation stabilisée	74
Figure 4.12 : L'oscilloscope	74
Figure 4.13 : L'inductance.....	75
Figure 4.14 : Les 3 charges $33\Omega / 6A$	75
Figure 4.15 : Signal de commande $\alpha = 0.5$	76
Figure 4.16 : Signal d'entrée et de sortie du hacheur.....	77
Figure 4.17 : Le courant en fonction de la tension.....	79
Figure 4.18 : Le courant en fonction de la tension.....	80
Figure 4.19 La puissance en fonction de la tension et du courant.....	80
La tension et du courant en fonction du temps.....	80
Figure 4.20 : Onduleur à 2 niveaux SEMIKRON	81
Figure 4.21 : Interface d'adaptation.....	81
Figure 4.22 : Le filtre LC	81
Figure 4.23 : Retard généré par l'interface d'adaptation.....	82
Figure 4.24 : Tensions des bras de l'onduleur V_{1M} , V_{2M} , V_{3M}	84
Figure 4.25 : Le premier secteur	85
Figure 4.26 : Le deuxième secteur.....	85
Figure 4.27 : Le troisième secteur	86
Figure 4.28 : Le quatrième secteur.....	86
Figure 4.29 : Le cinquième secteur.....	87
Figure 4.30 : Le sixième secteur.....	87
Figure 4.31 : Tension composée V_{12}	88
Figure 4.32 : La tension simple V_{1n}	88
Figure 4.33 : La tension composée après filtrage	89
Figure 4.34 : Le hacheur survolteur-dévolteur.....	90
Figure 4.35 : Circuit de commande du hacheur Buck-boost.....	91
Figure 4.38 : Les 4 batteries 12V/9Ah.....	91
Figure 4.39 : Les signaux de commandes.....	92
Figure 4.40 : Visualisation du temps mort.....	92
Figure 4.41 : Signaux des commandes complémentaire.....	93
Figure 4.42 : Signal d'entrée et de sortie du hacheur.....	93

Introduction générale

Introduction générale

Dans nos Jours, l'obtention de l'énergie électrique est une question cruciale car la demande et le besoin incontrôlé du monde de l'énergie ne cesse pas d'augmenter, ce qu'il cause une instabilité et affecte la réserve mondiale qui sera épuisé dans quelques dizaines d'années (selon l'estimation des chercheurs). L'extraction de cette énergie est basée sur des ressources finis combustibles (le pétrole, charbon, gaz) ou d'uranium. Ces ressources devenues de plus en plus rares et difficile de les trouvé et l'exploitation de ces énergies affecte l'environnement et les êtres vivants, la protection de l'environnement est devenue une problématique très importante autrement dit urgentes la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie.

Toutes ces problématiques poussent le monde en général et les pays industrialisées particulièrement à penser de diminuer la consommation des récepteurs d'énergie le maximum possible et d'augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant leurs efficacités, et ils ont aussi obligés de développer des nouvelles sources qui dépassent les inconvénients des sources qu'on a cité précédemment. Beaucoup de recherches scientifiques ont été menées dans le secteur d'énergie et plus particulièrement dans les secteurs des sources à énergie infinie (le soleil, le vent, ...) [1].

Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués principalement par le Soleil, la Lune, le vent, l'eau et la Terre (géothermique profonde...). Pour ces ressources à énergie inépuisable, les problèmes d'actualité sont à la conception, l'optimisation et la réalisation, donc Les techniques de production de l'électricité à partir de ces ressources demandent des études plus approfondis, en but de maximiser la puissance extraite de ces sources, en plus baisser les coûts (de fabrication, d'usage et de recyclage) [2].

L'exploitation de l'énergie PV permettrait de fournir en électricité des sites isolés des réseaux électriques et éviterait la création de nouvelles lignes électriques qui demandent généralement un lourd investissement. Les systèmes photovoltaïques utilisent des cellules pour convertir la radiation solaire en électricité, les cellules sont les éléments de base de ces systèmes, et ils sont les responsables de la conversion d'énergie [3].

Notre mémoire a comme objectif d'étudier une des types des systèmes PV, et de réaliser et commander l'un des composants de ce système qui est le hacheur Buck-boost. Ce mémoire est partagé en quatre chapitres :

Premièrement, il est nécessaire de citer quelques généralités sur l'énergie solaire, et ses caractéristiques, puis on aborde les techniques d'exploitation de cette énergie, en expliquant le principe de conversion de la puissance solaire en une puissance électrique, et en

Introduction générale

montrant les différentes générations des cellules photovoltaïques, et pour fermer ce chapitre on doit parler sur les systèmes PV et les différents applications concernées.

Dans le deuxième chapitre, on va présenter la chaîne PV que l'on a utilisé dans notre étude. Par la suite, dans un premier lieu, et avant tout on doit modéliser les éléments de la chaîne PV organe par organe, et bien sûr dimensionner les organes afin de pouvoir réaliser le système et le faire fonctionner correctement.

Dans le chapitre suivant, on va établir les commandes qu'on applique aux convertisseurs de puissance de notre chaîne, la commande MPPT pour le convertisseur boost, le régulateur PI ou le régulateur en mode glissant pour le hacheur réversible en courant, et les commandes MLI de l'onduleur. Enfin on va proposer un algorithme de gestion d'énergie globale de notre système pour optimiser le fonctionnement de la chaîne PV. Et on va tester ces commandes en une simulation sous Matlab/Simulink, en interprétant et en commentant les résultats de simulation.

En fin, nous allons valider les résultats de simulation par une réalisation pratique de notre système PV, la réalisation concerne le hacheur Buck-boost en premier lieu et tout ce qu'il l'accompagne (circuit de commande ...etc.), tout en appliquant l'MPPT et la commande de l'onduleur.

Nous terminons le travail par une conclusion générale et quelques perspectives de recherche envisagées.

Chapitre 01 :

Etat de l'art sur les systèmes photovoltaïques

Introduction

L'énergie solaire est disponible en abondance sur toute la surface terrestre, et il est très important de l'exploiter car le soleil est une source inépuisable, non polluante pour l'environnement, silencieuse et non dérangement pour les riverains. La conversion de cette énergie en électricité a été découverte en 1839, et il s'appelle l'effet photoélectrique. Le scientifique Becquerel l'a découvert par son observation au comportement électrique d'électrodes immergées dans un liquide conducteur exposé à la lumière.

Quelques dizaines d'années après, et en travaillant sur l'effet photoélectrique, beaucoup de phénomènes ont été découverts, ce qui conduit à l'apparition des piles solaires produisant de l'électricité, et par la suite la naissance de la cellule photovoltaïque. Cette dernière est une cellule fonctionne comme un capteur, et elle est constituée d'un matériau semi-conducteur absorbant l'énergie lumineuse et la transformant en courant électrique.

Dans ce chapitre on va faire une petite rappelle sur le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

1.1.L'énergie solaire :

Le soleil décharge continuellement une énorme quantité d'énergie radiante dans le système solaire, la terre intercepte une toute petite partie de l'énergie solaire rayonnée dans l'espace. Une moyenne de 1367 watts atteint chaque mètre carré du bord externe de l'atmosphère terrestre. La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser [1].

1.1.1. Caractéristique du rayonnement solaire :

L'éclairement est une quantité instantanée caractérise la puissance lumineuse reçue par unité de surface. Il s'exprime en W/m^2 . La grandeur associée à l'éclairement est appelée irradiante. Donc l'irradiation est la mesure de la densité d'énergie de la lumière du soleil, et elle est dépend de différents paramètres :

- ❖ l'orientation et l'inclinaison de la surface,
- ❖ de la latitude du lieu et son degré de pollution,
- ❖ de la période de l'année,
- ❖ de l'instant considéré dans la journée,
- ❖ de la nature des couches nuageuses.

Le rayonnement est l'énergie transportée par des ondes électromagnétique. La surface du soleil envoie le rayonnement et se trouve à une température de $5777(^{\circ}K)$. L'énorme quantité d'énergie émise par le soleil est le résultat d'une réactions nucléaires qui en lieu. La répartition du rayonnement solaire dans le monde est donnée sur la figure ci-dessous :

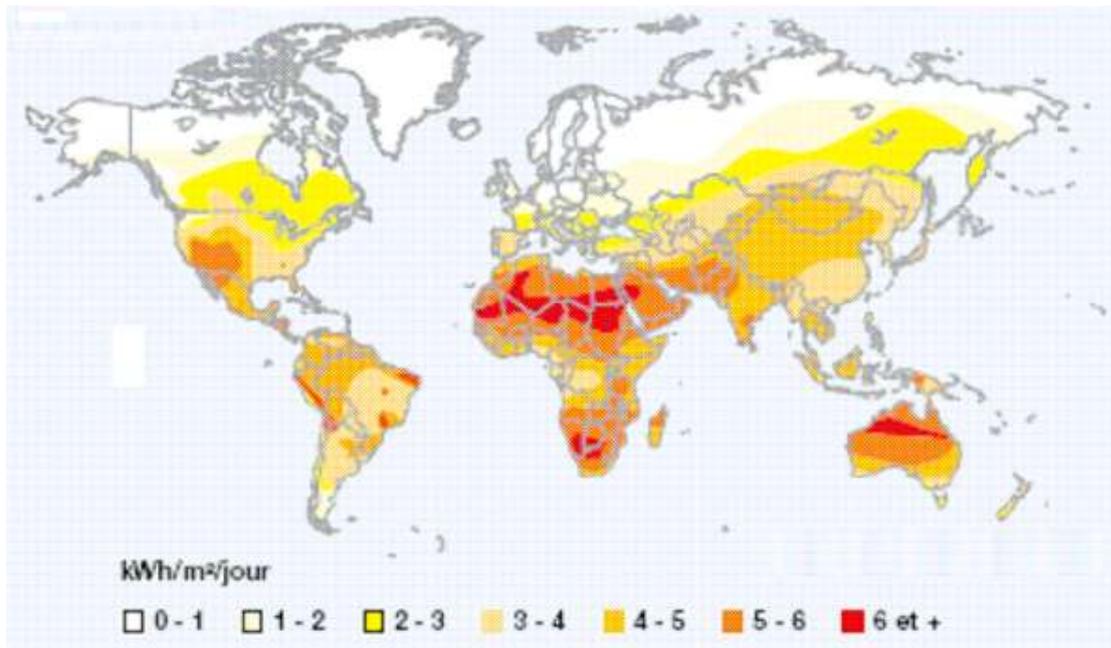


Figure 1.1 : La Carte du monde de l'irradiation moyenne annuelle.

La part d'énergie reçue sur la surface de la terre dépend de l'épaisseur de l'atmosphère à traverser. Celle-ci est caractérisée par le nombre de masse d'air AM.

Le rayonnement qui atteint le niveau de la mer à midi dans un ciel clair est de 1000 W/m^2 et est décrit en tant que rayonnement de la masse d'air "1" (ou AM1). Lorsque le soleil se déplace plus bas dans le ciel, la lumière traverse une plus grande épaisseur d'air, perdant plus d'énergie. Puisque le soleil n'est au zénith que durant peu de temps, la masse d'air est donc plus grande en permanence et l'énergie disponible est donc inférieure à 1000 W/m^2 [3].

Les scientifiques ont donné un nom au spectre standard de la lumière du soleil sur la surface de la terre : AM1.5G ou AM1.5D. Le nombre "1.5" indique que le parcours de la lumière dans l'atmosphère est 1.5 fois supérieur au parcours le plus court du soleil, c'est-à-dire lorsqu'il est au zénith (correspondant à une inclinaison du soleil de 45° par rapport au zénith). Le « G » représente le rayonnement "global" incluant rayonnement direct et rayonnement diffus et la lettre « D » tient compte seulement du rayonnement direct [4].

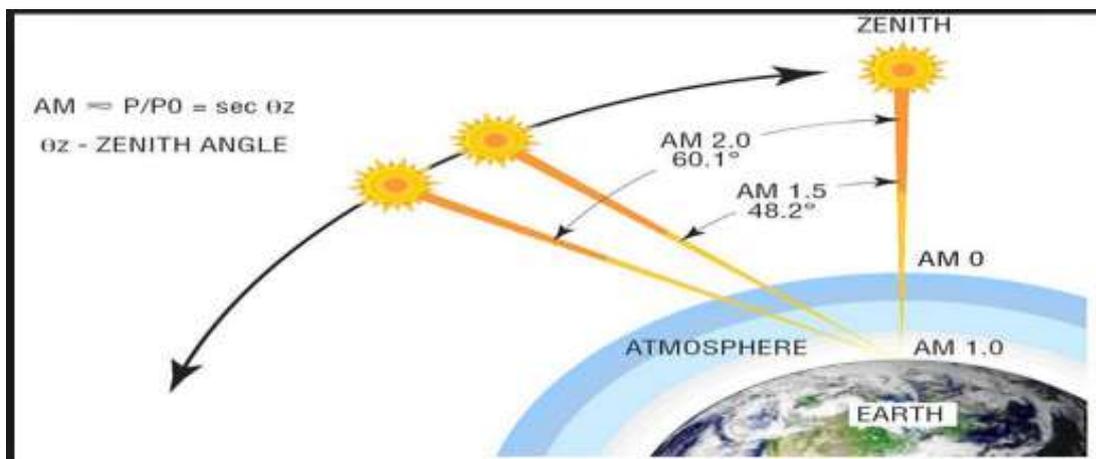


Figure 1.2 : Le spectre standard de la lumière du soleil.

1.1.2. Normalisation :

Les conditions standards de qualification des modules photovoltaïques sont : un spectre AM1.5 sous un éclairage de 1000W/m² et une température de 25°C. Les constructeurs de panneaux solaires spécifient les performances de leur matériel dans les conditions normalisées citées ci-dessus (S.T.C. : Standard Test Conditions).

1.1.3. Les inconvénients de l'énergie solaire :

L'énergie photovoltaïque ne se développe pas encore dans des grandes proportions à cause :

- D'un côté le faible rendement de conversion d'énergie.
- Et d'autre côté, le coût élevé des capteurs et des problèmes technique qui ne sont pas encore résolus pour que l'on puisse considérer le degré de maturité de ce système suffisant pour l'intégrer dans un domaine industriels très grand (en terme puissance consommée).

1.1.4. Les avantages de l'énergie solaire :

La production d'énergie électrique photovoltaïque présente des avantages importants :

- La ressource d'énergie utilisée est renouvelable et gratuite.
- Le processus de production d'électricité n'a aucun impact sur l'environnement.
- Fonctionnement indépendant du réseau ou système de secours pendant les pannes d'électricité.
- La production d'électricité est réalisée sans qu'il n'y ait aucune pièce en mouvement, ce qui entraîne des frais de maintenance excessivement faible et une exploitation aisée (les modules sont auto-nettoyés avec la pluie).
- Les systèmes solaires électriques sont flexibles et peuvent être élargis à n'importe quel moment pour répondre aux besoins en matière d'électricité.
- Ce qui est produit est généralement consommé sur place ce qui présente un intérêt du point de vue électrique puisque les pertes dans les câbles sont très faibles [1].

On distingue deux grands types d'applications susceptibles d'être alimentées par l'énergie photovoltaïque :

- Les systèmes de production autonomes pour l'alimentation de sites ou d'équipements isolés et non raccordés au réseau électrique.
- Les systèmes de pompage pour l'adduction d'eau.
- Les systèmes de production raccordés au réseau de distribution de l'électricité [1] [2].

1.2. Conversion de l'énergie solaire :

1.2.1. La cellule photovoltaïque :

C'est l'unité de base qui permet de convertir l'énergie solaire, elle est fabriquée à partir d'une jonction PN au silicium ce qu'on appelle le semi-conducteurs. Ce dernier est un matériau qui a les caractéristiques électriques d'un isolant, mais la probabilité qu'un électron puisse contribuer à un courant électrique autrement dit, la conductivité électrique de ce matériau est intermédiaire entre celle des métaux et celle des isolants.

Pour obtenir du silicium dopé N, on ajoute du phosphore, ce type de dopage permet au matériau de libérer facilement les électrons. On ajoute du bord pour obtenir du silicium dopé P, dans ce cas, le matériau crée des lacunes électroniques appelées trous. La jonction PN est obtenue en dopant les deux faces d'une tranche de silicium.

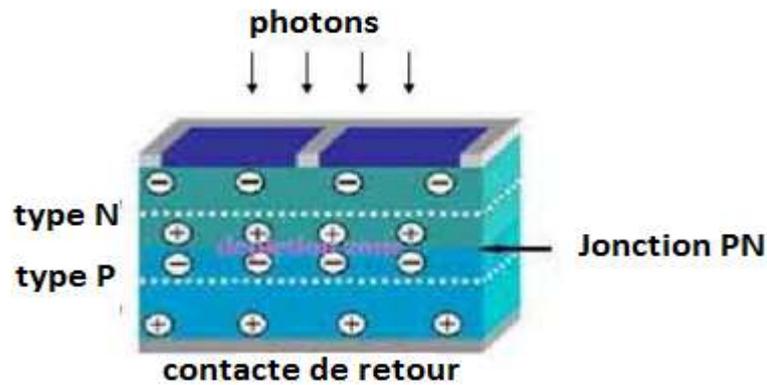


Figure 1.3 : La Jonction P-N dans une cellule.

1.2.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

Les atomes de la jonction libèrent des charges électriques de signes opposés (sous l'effet de le rayonnement solaire), qui s'accumulent de part et d'autre de la jonction, ce qu'il forme un générateur électrique. A la base de ce phénomène physique qui est dite « effet photovoltaïque » la cellule convertit le rayonnement solaire en énergie électrique. Ce phénomène sert à créer une force électromotrice dans la cellule quand cette dernière est exposée à la lumière.

L'assemblage de plusieurs cellules photovoltaïques forme un panneau photovoltaïque, les panneaux sont aussi appelés modules photovoltaïques, et le champ photovoltaïque est obtenu lorsqu'on regroupe plusieurs panneaux sur un même site. On note aussi qu'on construit un générateur PV par l'association de plusieurs cellules (en série ou parallèle), la tension obtenue dépend principalement du matériau utilisé pour construire les cellules.

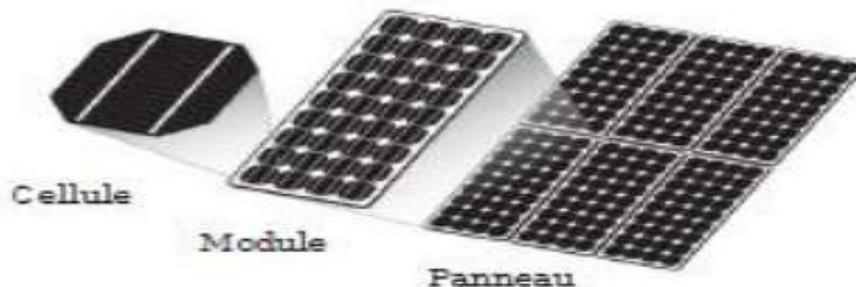


Figure 1.4 : Cellule –Module–Panneau.

1.3. Les types des générateurs PV :

Actuellement, il existe essentiellement deux technologies en photovoltaïque : le silicium mono ou poly cristallin (technologie dite de première génération) et le silicium amorphe. D'autres technologies sont en phase de début de commercialisation ou de recherche :

Silicium cristallin couche mince, Cuivre-Indium-Sélénium - CIS, Tellure de Cadmium - CdTe (technologies dites de deuxième génération, avec le silicium amorphe) et cellules organiques, cellules de Grätzel et cellule multi-jonction (technologies dites de troisième génération) [1] [3].

1.3.1. Silicium monocristallin

Les cellules des modules photovoltaïques monocristallins sont gris bleuté ou noir d'un aspect uniforme. Pour les fabriquer, on fond du silicium en forme de barreau. Lors d'un

refroidissement lent et maîtrisé, le silicium se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension. On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Leur durée de vie : 20 à 30 ans.

Lorsque cette cellule est exposée au rayonnement électromagnétique solaire, les photons de la lumière viennent frapper la face avant de la cellule, ce qui permet aux électrons (présents en abondance sur cette face) de se déplacer sur la face arrière de la cellule (qui présente un manque d'électrons) [1] [2].

1.3.1.1. Avantage :

Bon rendement, de 12% à 18% bon ratio Wc/m² (environ 150 Wc/m) ce qui permet un gain de place si nécessaire nombre de fabricants élevé

1.3.1.2. Inconvénients :

Coût élevé et un rendement faible sous un faible éclaircissement.



Figure 1.5 : La cellule monocristalline.

1.3.2. Silicium poly cristallin (multi cristallin)

Pendant le refroidissement du silicium dans une lingotière, il se forme plusieurs cristaux. Ce type de cellule photovoltaïque est d'aspect bleuté, mais pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux (bleues d'un aspect mosaïque).

1.3.2.1. Les avantages :

Cellule carrée (à coins arrondis dans le cas du Si monocristallin) permettant un meilleur foisonnement dans un module moins cher qu'une cellule monocristalline

1.3.2.2. Les inconvénients :

Moins bon rendement qu'une cellule monocristalline : 11 à 15% ratio Wc/m² moins bon que pour le monocristallin (environ 100 Wc/m²) rendement faible sous un faible éclaircissement.

Ce sont les cellules les plus utilisées pour la production électrique (meilleur rapport qualité-prix). Durée de vie : 20 à 30 ans

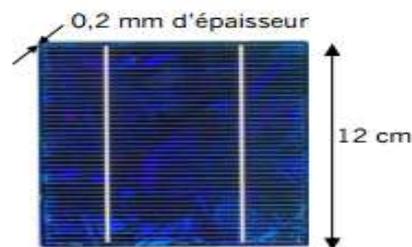


Figure 1.6 : La cellule poly cristalline.

1.3.3. Silicium amorphe

Le silicium est déposé sur un support généralement flexible, le rendement est d'environ 5%. Cette technologie permet de produire de l'énergie électrique même avec un temps nuageux (ceci n'est pas le cas avec les modules poly ou monocristallin). Les bandes flexibles sont de longueur très variable (moins d'un mètre jusqu'à plus de 5 mètres). Le silicium lors de sa

transformation, produit un gaz, qui est projeté sur une feuille de verre. La cellule est gris très foncé. C'est la cellule des calculatrices et des montres, elles sont dites "solaires".

1.3.3.1. Les avantages :

Intégration sur supports souples ou rigides. Fonctionne avec un éclairage faible ou diffus (même par temps couvert) un peu moins chère que les autres technologies.

1.3.3.2. Les inconvénients :

Rendement faible en plein soleil, de 6% à 8% nécessité de couvrir des surfaces plus importantes que lors de l'utilisation de silicium cristallin (ratio Wc/m² plus faible, environ 60 Wc/m²) performances qui diminuent avec le temps (environ 7%).

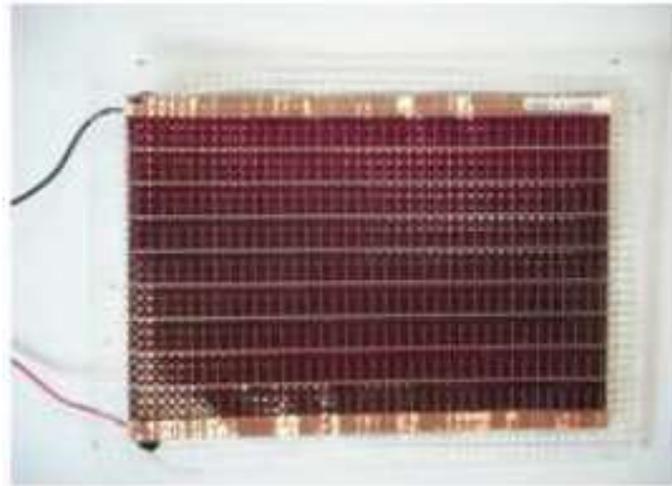


Figure 1.7 : La cellule amorphe

1.4. Groupement des cellules PV :

1.4.1. Association série :

Ce groupement, le courant est commun à toutes les cellules, et il permet d'augmenter la tension de sortie. Pour un groupement de n cellules identiques montées en série la tension de sortie U_s a pour expression :

$U_s = nU_c$ avec U_c : tension fournie par une seule cellule

1.4.2. Association parallèle :

Le groupement en parallèle maintient une tension commune à toutes les cellules, et il permet d'augmenter le courant de sortie. Pour un groupement de n cellules identiques montées en parallèle, le courant de sortie I_s a pour expression générale :

$I_s = nI$ avec I : courant fourni par une cellule.

1.5. Applications des systèmes PV :

On distingue deux grandes types d'applications susceptibles d'être alimentées par l'énergie photovoltaïque :

- Les systèmes de production autonomes pour l'alimentation de sites ou d'équipements isolés et non raccordés au réseau électrique.
- Les systèmes de production raccordés au réseau de distribution de l'électricité.

Les systèmes PV peuvent être associés à une autre source tel que l'éolien, on appelle ces systèmes les systèmes hybrides.

1.5.1. Système connecté au réseau :

Le champ photovoltaïque est connecté au réseau par l'intermédiaire d'un onduleur, le rôle principal est d'injecter l'énergie électrique produite dans les réseaux électriques. Le particulier peut revendre tout ou partie de l'électricité qu'il produit. Dans ce cas, il n'est pas nécessaire d'installer de batteries de stockage de l'énergie produite.

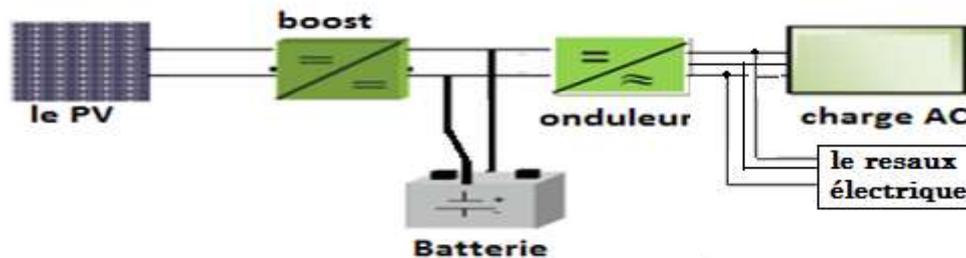


Figure 1.8 : Système photovoltaïque connecté au réseau.

1.5.2. Système autonome :

Ce système est fonctionné indépendamment de toutes autres sources d'énergie, et dans la majorité des cas, ce système est utilisé dans les sites isolés. Dans tel site, le champ photovoltaïque est dimensionné pour fournir de l'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner des récepteurs précis (éclairage et équipement domestique). On a besoin d'un système de régulation et une batterie d'accumulateurs permettent de stocker l'énergie électrique et la réutiliser en l'absence de soleil.

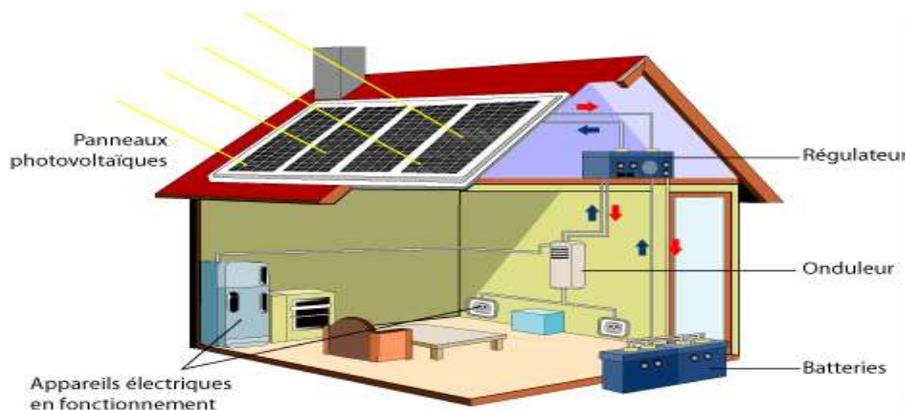


Figure 1.9 : Système photovoltaïque autonome.

Selon la manière de disposition des différentes parties du système photovoltaïque en sites isolés, on retrouve principalement deux structures :

- La structure en cascade : le pack du batterie est connecté directement au bus continu de l'onduleur.
- La structure à bus continue commun.

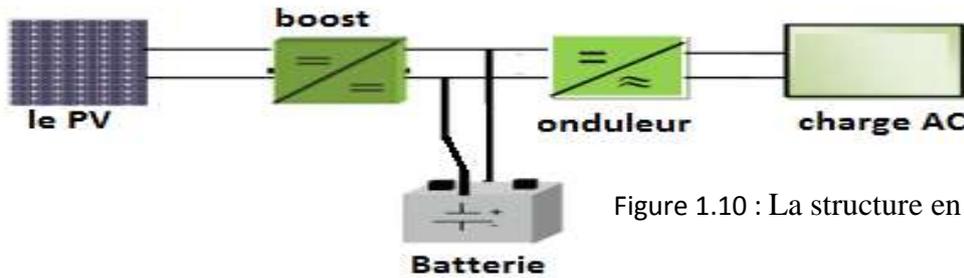


Figure 1.10 : La structure en cascade.

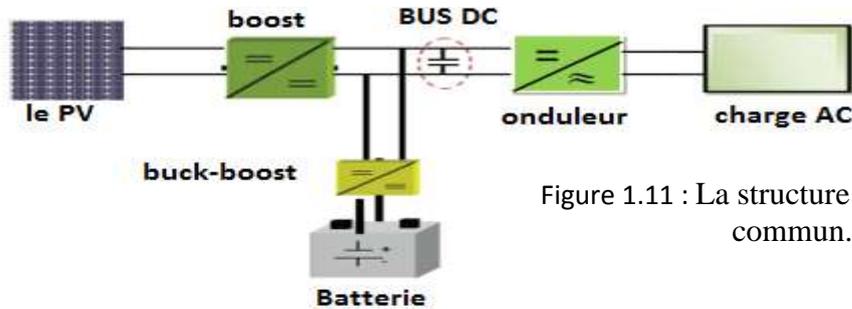


Figure 1.11 : La structure a bus continue commun.

Remarque : La dernière configuration est celle étudiée dans ce mémoire.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait des rappels sur le principe de conversion et d'exploitation de l'énergie solaire en une énergie utilisable (électrique) et on a vu ce que cette source a d'intéressants avantages, et comme il est très important de développer l'utilisation de tel source, ainsi on a jeté la lumière sur les inconvénients des panneaux solaires, afin de poser les problématiques des panneaux et d'essayer de réduire ces inconvénients.

De plus, les caractéristiques des cellules photovoltaïques et on a cité les différents structures d'une installation PV, précisément les deux structures pour une installation en site isolé, et on a cité que l'utilisation du système PV avec une autre source renouvelable est également possible.

Chapitre 02 :
Modélisation et dimensionnement des
organes de la chaîne
photovoltaïque.

Introduction :

Les systèmes photovoltaïques sont divisés en deux grandes catégories, les systèmes autonomes et les systèmes couplés au réseau.

La conception et la modélisation des systèmes est très importantes, pour notre cas en mode isolé la structure à bus continue du système doit être correctement modélisée et dimensionnée afin de le commander et pour qu'il puisse fournir l'énergie d'une manière continue et optimale.

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation des organes de notre chaîne (structure à bus continue), ainsi le dimensionnement des convertisseurs DC/DC, le bus continue et le filtre passif LC.

2.1.Description de La chaîne PV :

Les systèmes autonomes sont destinés pour répondre aux besoins de consommation d'un client isolé du réseau électrique (mode isolé). Ces systèmes comportent particulièrement des éléments de stockage afin d'adapter la production photovoltaïque à la demande, tout en respectant la gestion de la charge et de la décharge afin d'augmenter la durée de vie de l'installation.

Notre système que l'on va étudier est composé d'un générateur PV, qui est relié par l'intermédiaire d'un hacheur élévateur (Boost) à un onduleur triphasé de tension connecté à une charge, plus un dispositif de stockage. Le faible rendement et le coût élevé des panneaux PV nous ont incité à contrôler le PV à travers le hacheur (boost) de tel sorte qu'il produit le maximum de puissance possible (Maximum Power Point Tracking -MPPT), ou bien pour fonctionner en mode puissance limitée.

Le dispositif de stockage est tout simplement un hacheur réversible en courant et une batterie, il a des avantages économiques et il est contrôlé et utilisé pour avoir une continuité de service et une meilleure qualité d'énergie fournie.

La figure (2.1) représente la structure générale du système PV étudié

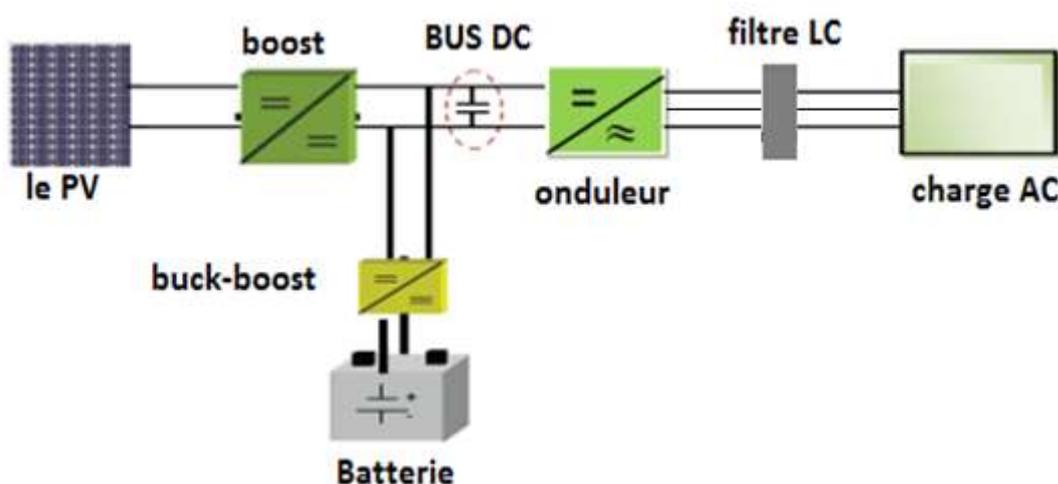


Figure 2.1 : Le système étudié et réalisé

2.2. Le modèle du générateur photovoltaïque [4]:

Dans notre étude on s'intéresse au système PV comme une source d'énergie inépuisable et suffisante pour notre consommation. Le circuit équivalent à une diode est le modèle le plus utilisé pour représenter un PV :

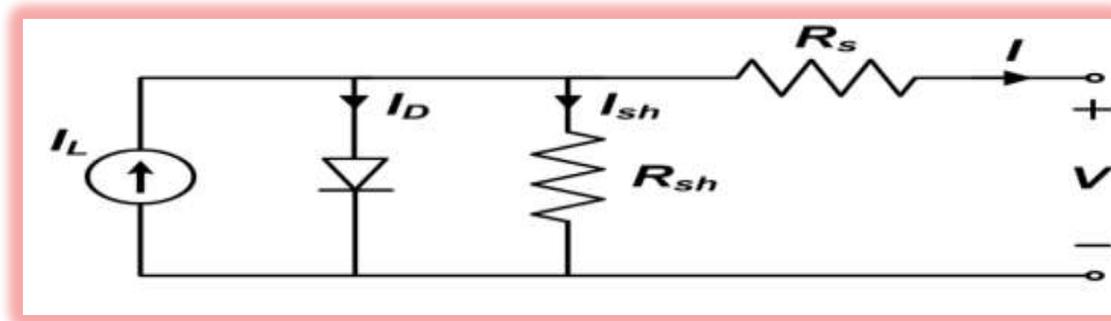


Figure 2.2 : Le modèle à diode du générateur photovoltaïque.

- Tel que :
- I_L : courant photovoltaïque
 - R_{sh} : Résistance shunt
 - R_s : La résistance série
 - I : courant de charge noté I_{pv} .
 - V : tension de sortie noté V_{pv} .

On peut néglige R_{sh} parce qu'elle est très grande, et la relation entre I_{pv} et V_{pv} .est :

$$I_{pv} = I_L - I_D = I_L - I_0 \left[\exp\left(\frac{V_{pv} + I_{pv}R_s}{\alpha}\right) - 1 \right] \quad (2.1)$$

Tel que : I_0 : courant de saturation, et α : Facteur de saturation thermique

Pour obtenir la caractéristique $I_{pv}-V_{pv}$ on doit déterminer les 4 paramètres (I_L, I_0, R_s, α) qui sont reliés par des fonctions non linéaire avec la température, l'éclairement solaire et I_{pv} , ces relations sont des relations non-linéaire.

Pour obtenir la caractéristique $V_{pv}-I_{pv}$ on doit déterminer les 4 paramètres (I_0, I_L, R_s, α) qui sont reliés par des fonctions non linéaire avec la température, l'éclairement solaire et I_{pv} :

$$I_L = \frac{\phi}{\phi_{ref}} \left[I_{Lref} + \mu_{1cc}(T_c - T_{cref}) \right] \quad (2.2)$$

Avec :

ϕ : Irradiation solaire

ϕ_{ref} : irradiation solaire de référence

I_{Lref} : courant photovoltaïque de référence aux conditions $1000W/m^2$ et $25^\circ C$

μ_{1cc} : coefficient de la température du courant de court-circuit

T_c : température de la cellule photovoltaïque

T_{cref} : température de référence

$$I_0 = I_{0ref} \left(\frac{T_c + 273}{T_{cref} + 273} \right)^3 \exp \left[\frac{e_{gap} N_s}{\alpha_{ref}} \left(1 - \frac{T_{cref}}{T_c} \right) \right] \quad (2.3)$$

$$I_{0ref} = I_{Lref} \exp \left(\frac{-U_{coref}}{\alpha_{ref}} \right) \quad (2.4)$$

Avec : I_{0ref} : courant de saturation de référence

e_{gap} : énergie du gap du semi-conducteur

N_s : nombre de cellules en série du module photovoltaïque

α_{ref} : valeur de α aux conditions de référence

U_{coref} : la tension du circuit ouvert aux conditions de référence

$$\alpha_{ref} = \frac{2U_{PMref} - U_{coref}}{\frac{I_{CCref}}{I_{CCref} - I_{PMref}} + \ln \left(1 - \frac{I_{PMref}}{I_{CCref}} \right)} \quad (2.5)$$

$$\left\{ \alpha = \left(\frac{T_c + 273}{T_{cref} + 273} \right) \alpha_{ref} \right\} \quad (2.6)$$

U_{PMref} : tension du point de puissance maximale aux conditions de référence

I_{PMref} : courant du point de puissance maximale aux conditions de référence

I_{CCref} : courant du court-circuit aux conditions de référence

$$R_s = \frac{\alpha_{ref} \ln \left(1 - \frac{I_{PMref}}{I_{CCref}} \right) - U_{PMref} + U_{coref}}{I_{PMref}} \quad (2.7)$$

2.2.1. La caractéristique I-U du PV :

Concernant la caractéristique U-I du PV on étudie en trois (03) cas :
1-L'éclairement et température sont fixes, l'allure obtenu est le suivant :

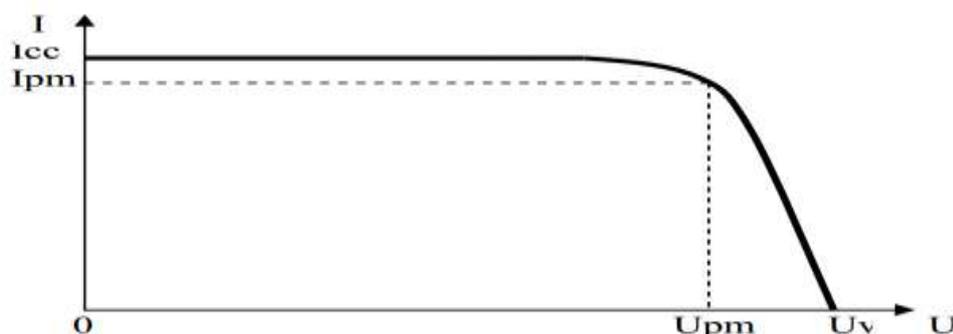


Figure 2.3 : Caractéristique I-U du PV.

La courbe présente 2 point de fonctionnement, à vide ($U_V, I=0$) et en court-circuit ($U=0, I_{CC}$), leurs valeurs diffèrent d'un panneau à un autre. La puissance maximale correspond au point (U_{Pm}, I_{Pm}) comme l'indique la courbe U/P ci-dessous :

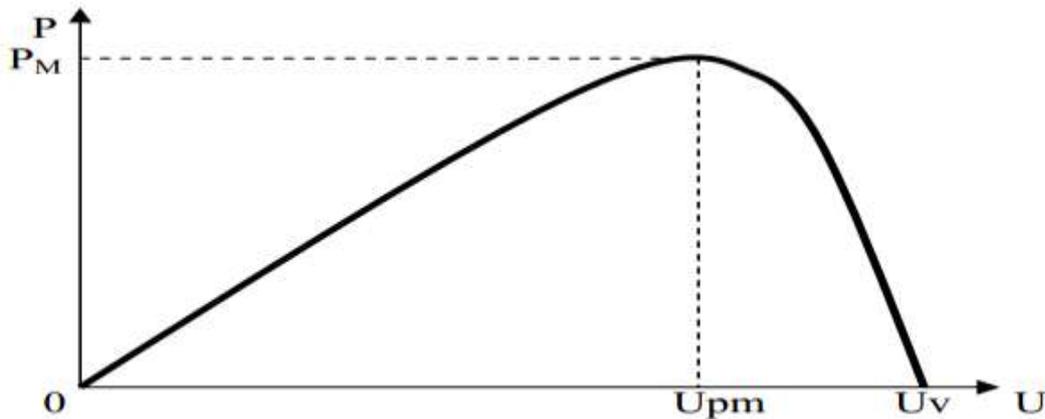


Figure 2.4 : La caractéristique P-U du PV

Pour une cellule monocristalline de 10x10cm, les valeurs caractéristiques sont :

$I_{CC} = 3A$ et $U_V = 0,57V$ $P_M = 1,24W$, $U_{pm} = 0,45V$, $I_{pm} = 2,75A$ ($G = 1000W/m^2$ et $\theta = 25^\circ C$).

Pour les 2 autres cas, on choisit un module PV et on développe son modèle dans l'environnement SIMULINK, et on calcule les 4 paramètres de la cellule à l'aide de données du constructeur. On prend pour ce modèle comme entrées l'irradiation solaire et la température ambiante.

2-on fixe la température à $25^\circ C$ et on varie l'irradiation on obtient comme résultat :

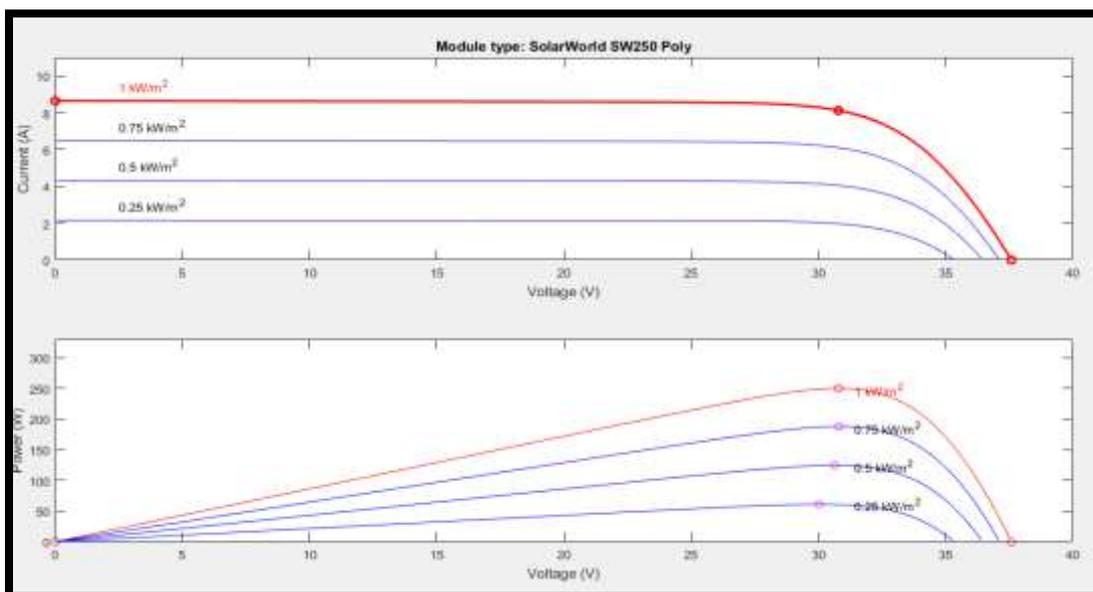


Figure 2.5 : La variation de I-U et P-U en fonction de l'irradiation.

3-on fixe l'irradiation à 1000W/m^2 on obtient comme résultat :

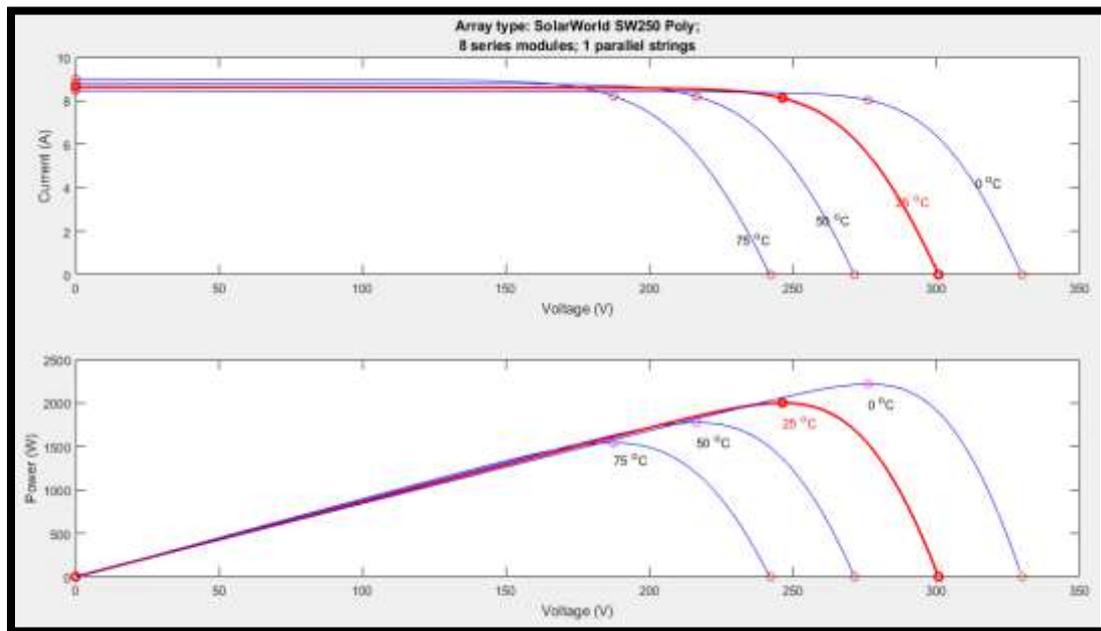


Figure 2.6 : La variation d'I-U et P-U en fonction de la température.

Commentaires :

Les simulations montrent que :

- La puissance max fournie par le PV est correspond à la tension à vide.
- Lorsque l'irradiation augmente, la courbe (V-I) translate vers le haut ce qui est traduit par l'augmentation de la puissance maximale.
- Lorsque la température augmente, le courant augmente légèrement tandis que la tension diminue, ce qui est traduit par la diminution de la puissance maximale.

On définit la puissance de crête comme la puissance maximum fournie par une cellule pour un éclairement $G = 1000\text{W/m}^2$, et une température $\theta = 25^\circ\text{C}$ et une répartition spectrale du rayonnement dit AM 1,5. L'unité de cette puissance est le Watt crête, noté W_c . Les constructeurs spécifient toujours cette puissance d'un panneau photovoltaïque. Elle est rarement atteinte car l'éclairement est souvent inférieur à 1000W/m^2 et la température des panneaux en plein soleil dépasse largement les 25°C .

Les puissances mises en jeu en fonction des différentes technologies, poly cristallin ou monocristallin vont respectivement de $110 W_c$ à $150 W_c$ par mètre carré (soit un rendement entre 11 et 15 %). Le module produit un courant continu et une tension d'environ 20 V. Les fabricants garantissent 80 % de la puissance après 25 ans de fonctionnement [1].

2.3. Dispositif de stockage :

Il y a nécessité de stockage électrique parce que la demande électrique est décalée dans le temps à cause de l'apport solaire. La demande énergétique est en fonction de la charge à alimenter, de plus, l'apport énergétique solaire est périodique et aléatoires vus l'alternance jours/nuit été/hiver et vus des conditions météorologique.

De ce fait, les durées de stockage sont très variables, par exemple, elles varient de quelques heures pour compenser les nuits et les passages nuageux, et varient de plusieurs jours pour un usage quotidien répétitif. L'intérêt du dispositif stockage est la disponibilité d'une tension quasi-constante, autrement dit, l'adaptation de la tension de la charge. Ce système est composé d'une batterie et d'un hacheur réversible en courant.

2.3.1. Rôles de la batterie :

Dans notre système, la batterie assure deux fonctions essentielles :

- Autonomie : Une batterie permet de répondre aux besoins de la charge en tout temps, (la nuit, temps nuageux).
- Stabilisation de la tension : la batterie permet de fournir une tension constante, en permettant aux appareils un fonctionnement à une tension optimisée et en éliminant les écarts de tension du champ PV.

Les batteries les plus utilisées couramment dans les systèmes photovoltaïques sont les batteries avec accumulateurs électrochimiques. Chaque type d'accumulateurs électrochimiques a ses propres particularités, et selon les méthodes de construction, elles auront des caractéristiques de fonctionnement très différentes. Le type d'accumulateur le plus connue et ancien, et le plus utilisé dans des systèmes pareils est l'accumulateur au plomb-acide (Pb-acide).

2.3.2. Construction et principe de fonctionnement [30]:

L'accumulateur au plomb-acide contient une plaque positive, ou cathode, faite d'oxyde de plomb (PbO₂), et une plaque négative, ou anode, faite de plomb. Ces plaques sont immergées dans un électrolyte, l'acide sulfurique dilué. Quand une charge est connectée entre les deux plaques, l'oxyde de plomb de la plaque cathodique et le plomb de la plaque anodique sont convertis en sulfate de plomb en réaction avec l'acide sulfurique de l'électrolyte. Cette réaction amène un flux d'électrons entre les deux plaques au travers du circuit externe. La réaction chimique réversible est la suivante :

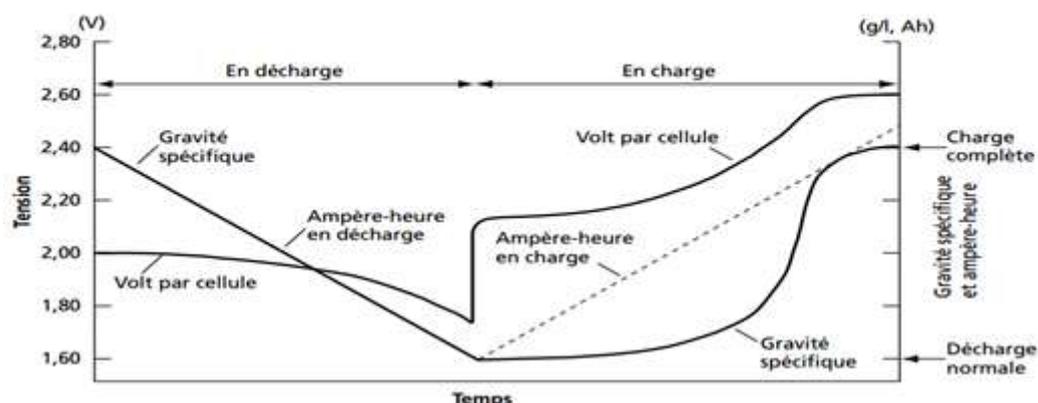
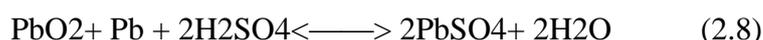


Figure 2.7 : Etat de charge d'une batterie au plomb-acide selon la densité de l'électrolyte [30].

À mesure que la batterie se décharge, la concentration en eau dans l'électrolyte augmente et la concentration d'acide diminue. Un accumulateur au plomb-acide déchargé pendant une longue période de temps peut être endommagée de façon permanente parce que les cristaux de sulfate de plomb qui se forment sur les plaques durant la décharge peuvent devenir trop importants et empêcher leur reconversion en plomb ou en dioxyde de plomb.

De plus, parce que les cristaux de sulfate de plomb sont plus gros, ceux-ci peuvent altérer la structure des plaques, causant une perte du matériau actif, des courts-circuits et des dommages physiques à la batterie. La recharge de l'accumulateur est effectuée en fournissant un courant continu en direction opposée au courant de décharge sur les plaques. Cette réaction inverse produit de l'acide sur les plaques qui est alors retourné dans l'électrolyte. La densité de l'électrolyte (g/litre) varie donc selon l'état de charge de la batterie [20] [30].

Les plaques d'un accumulateur au plomb-acide sont faites de pâtes de plomb (anode) et d'oxyde de plomb (cathode) pulvérisées et séchées sur une grille électrode qui les retient en place et sert aussi de collecteur pour les électrons circulant dans l'accumulateur. L'oxyde de plomb pur manque de robustesse et ne peut être utilisé dans la fabrication de la plupart des batteries, sauf pour l'accumulateur stationnaire où l'on utilise de grosses électrodes. Afin de rendre la cathode plus robuste, certains fabricants ajoutent de l'antimoine dans une concentration de 0,1 % à 8 % du poids de la plaque [31].

Les caractéristiques essentielles d'une batterie :

- La capacité maximal Q : est la quantité d'électricité, évaluée habituellement en ampères -heures (Ah), qu'un accumulateur pleinement chargé peut faire circuler pendant une période de décharge donnée jusqu'à une tension d'arrêt et une température définies.
- L'état de charge : noté SOC (State Of Charge), il représente le rapport entre la capacité de la batterie à un moment donnée et la capacité nominale.
- Durée de vie : Les contraintes sont si nombreuses qui agissent sur ce paramètre que les constructeurs sont obligés de préciser le mode de fonctionnement pour pouvoir donner des valeurs approximatives: les durées de vie exprimées en années sont données pour un fonctionnement en floating à 25 °C. La durée de vie varie de 2 à 7 ans pour les batteries au Pb. Elle diminue de moitié pour chaque élévation de 10 °C de la température d'utilisation.
- La tension : dépend de son type et de la concentration ou densité relative de l'électrolyte. Elle varie selon le degré de charge, le régime de charge/décharge et la température.

La plus simple modèle de la batterie est qui on va utiliser est la suivantes :

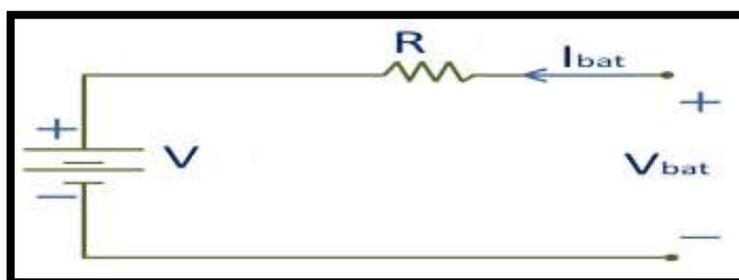


Figure 2.8 : Le modèle électrique de la batterie.

La batterie est considéré comme étant une source de tension en série avec une résistance représente la résistance interne de la batterie.

- Charge :

$$V = [2 + 0.148SOC(t)]n \quad (2.9)$$

$$R = \frac{0.758 + \frac{0.1309}{1.06 - SOC(t)}}{Q_p}n \quad (2.10)$$

Avec n : nombre de cellules de 2v de la batterie en séries. Q_p : capacité nominale en watts-heures.

- Décharge :

$$V = [1.926 + 0.124SOC(t)]n \quad (2.11)$$

$$R = \left(\frac{0.19 + \frac{0.1307}{SOC(t) - 0.14}}{Q_p} \right)n \quad (2.12)$$

Alors dans les 2 cas on a besoin d'estimer le SOC à tout instant, et la relation permet de faire ceci est :

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \int_{t-1}^t \left[k \left(\frac{VI_{bat}}{Q_p} \right) - D SOC(t) \right] \frac{dt}{3600} \quad (2.13)$$

Où D : taux de décharge interne de la batterie (en h^{-1})
k : rendement charge décharge de la batterie.

2.4. Convertisseur DC-DC :

Les hacheurs sont des convertisseurs continu-continu, ils permettent de faire varier la valeur moyenne de la tension continue à leur sortie. Pour faire varier la valeur moyenne de la tension aux bornes d'une charge, on applique une tension continue constante pendant un certain temps sur une période. La modélisation et la commande de ces convertisseurs occupent une place de plus en plus importante dans le domaine de l'électronique de puissance. La " modélisation moyenne " est la plus courante. les modèles moyennes dans l'espace d'état sont largement acceptées dans la pratique, principalement de par leur simplicité, leur généralité et leur utilité pratique qui n'est plus à démontrer. Divers modèles moyennés ont été présentés dans la littérature spécialisée. Il subsiste cependant quelques questions fondamentales en ce qui concerne les méthodologies moyennes qui n'apportent pas toujours une réponse satisfaisante. Ces problèmes non résolus de modélisation touchent essentiellement à la validation pratique, à l'intégration des parasites du circuit électrique réel et à l'application à la conception de la boucle de commande [5].

Les convertisseurs utilisés dans les systèmes PV pour générer les courants et les tensions souhaités sont :

- Les convertisseurs de type Buck (abaisseurs) dans lesquels $V_s < V_e$.
- Les convertisseurs de type Boost (élevateurs) dans lesquels $V_s > V_e$.
- Les convertisseurs de type Buck-Boost qui peuvent fonctionner en Buck ou en Boost en fonction du rapport cyclique α .

2.4.1. Le hacheur Survolteur (BOOST) :

C'est un convertisseur de puissance qu'il a la capacité de fournir une tension plus élevée que celle appliquée à son entrée, de plus dans notre cas il est utilisé pour adapter la tension du générateur photovoltaïque à la tension du bus continu.

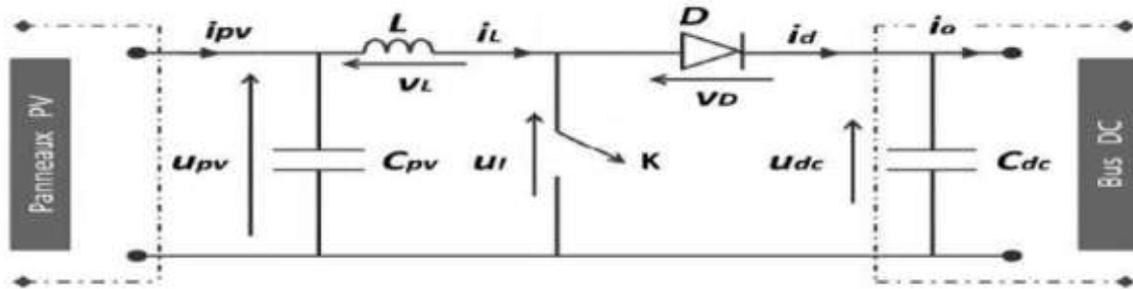


Figure 2.9 : Le hacheur Survolteur (BOOST) .

Selon l'état de l'interrupteur commandé (K), nous avons deux phases de fonctionnement:

Intervalle [0, αT] :

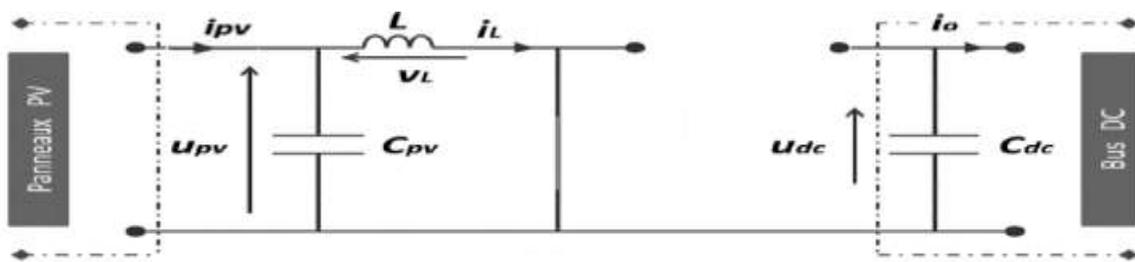


Figure 2.10: Le hacheur Survolteur (BOOST) dans la phase de fonctionnement [0, αT].

(K) est fermé, la diode est polarisée en inverse ($U_d = -U_{dc}$), dans ce cas le bus continu est isolé de la source .pendant cette durée(t entre $[0, \alpha T]$), le courant « i_L » croit Progressivement, ce qui permet à l'inductance de stocker de l'énergie.

Le modèle d'équation dans cette configuration est le suivant :

$$\begin{cases} V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = U_{pv}(t). \\ i_{C_{dc}}(t) = C_{dc} \frac{dU_{dc}(t)}{dt} = -i_o(t). \end{cases} \quad (2.14)$$

Intervalle [αT, T]:

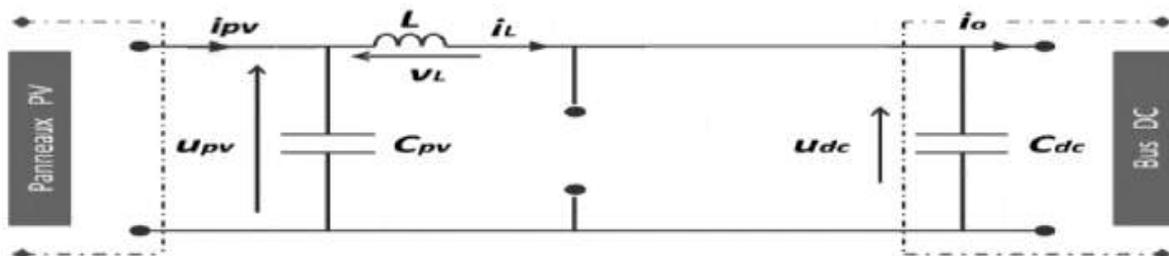


Figure 2.11 : Le hacheur Survolteur (BOOST) dans la phase de fonctionnement [αT, T].

L'interrupteur (K) est ouvert, l'inductance (L_{pv}) s'oppose à la variation du courant dans son circuit et une tension à ses bornes est créée. La tension ainsi créée s'ajoute à la tension du générateur PV et de cette somme dépasse la tension du bus continue (U_{dc}), la diode entre en condition. Pendant cette durée (t entre $[\alpha T, T]$), l'inductance (L_{pv}) restitue une partie de l'énergie (ou toute l'énergie) emmagasinée dans la phase précédente.

Le modèle d'équation dans cette configuration est le suivant :

$$\begin{cases} V_L(t) = L_{bat} \frac{di_L(t)}{dt} = U_{pv}(t) - U_{dc}(t). \\ iC_{dc}(t) = C_{dc} \frac{dU_{dc}(t)}{dt} = i_L(t) - i_0(t). \end{cases} \quad (2.15)$$

En utilisant le principe de la valeur moyenne, on peut déduire Le modèle moyen de ce convertisseur qui est décrit par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} V_L(t) = L_{bat} \frac{di_L(t)}{dt} = -(1 - \alpha) U_{dc}(t) + U_{pv}(t). \\ iC_{dc}(t) = C_{dc} \frac{dU_{dc}(t)}{dt} = (1 - \alpha) i_L(t) - i_0(t). \end{cases} \quad (2.16)$$

La relation entre la tension de sortie et celle de l'entrée est donnée comme suit : $U_{pv} = \frac{1}{1-\alpha} \cdot U_{dc}$ tel que α et le rapport cyclique. Grâce à cette dernière expression, on peut voir que la tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée (le rapport cyclique variant entre 0 et 1).

2.4.2. Hacheur survolteur-dévolteur (BUCK-BOOST) :

Dans le cas de la batterie en entrée. Il faudrait utiliser un hacheur réversible en courant pour que la batterie puisse fonctionner dans l'état de la charge et de la décharge, ce qui garantit le transfert de l'énergie dans les deux sens,

Ce convertisseur est constitué de deux interrupteurs formant une cellule de commutation.

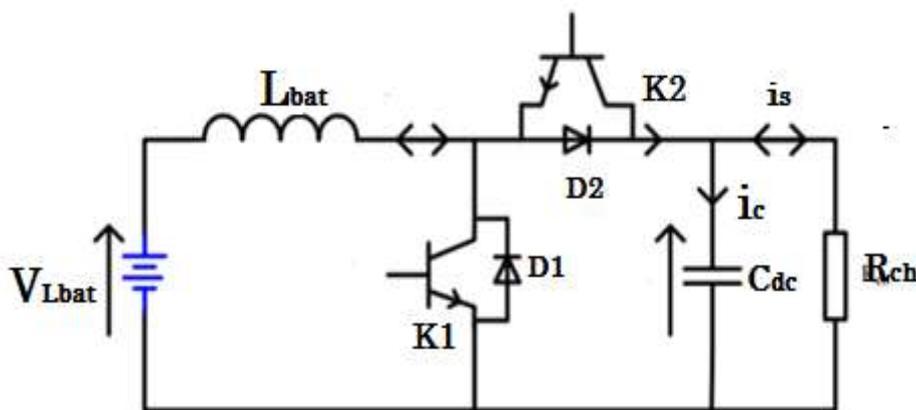


Figure 2.12 : Hacheur réversible en courant associé aux batteries.

Pour assurer le transfert énergétique de ou vers la batterie. la direction du courant I_{bat} nous donne deux configurations possibles dans l'état de la charge et de la décharge de la batterie.

La première configuration : Etat de la charge.

Cette configuration consiste à charger la batterie. Dans cette configuration l'IGBT de l'interrupteur K_2 et la diode du K_1 sont utilisés.

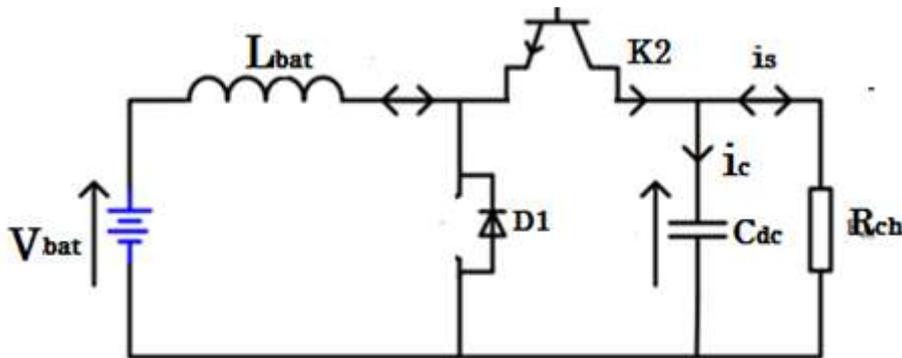


Figure 2.13 : Etat de la charge.

Le modèle d'équation dans cette configuration est le suivant :

$$\begin{cases} V_{Lbat}(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_{bat}(t) + U_{dc}(t). \\ iC_{dc}(t) = C_{dc} \frac{dU_{dc}(t)}{dt} = -i_{Lbat}(t) + i_s(t). \end{cases} \quad (2.17)$$

$$0 < t < \alpha_{K2}T.$$

$$\begin{cases} V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -V_{bat}(t). \\ iC_{dc}(t) = C_{dc} \frac{dU_{dc}(t)}{dt} = i_s(t). \end{cases} \quad (2.18)$$

$$\alpha_{K2}T < t < T.$$

La deuxième configuration : Etat de la décharge.

Cette configuration consiste à décharger la batterie. Dans cette configuration l'IGBT de l'interrupteur K_1 et la diode du K_2 sont utilisés.

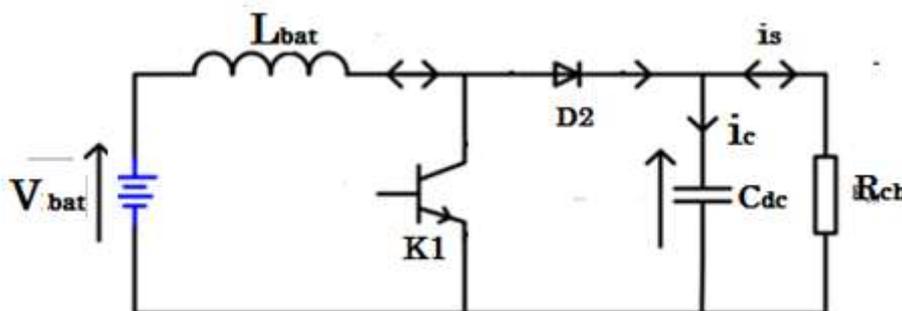


Figure 2.14 : Etat de la décharge.

Le modèle d'équation dans cette configuration est le suivant :

$$\begin{cases} V_{Lbat}(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_{bat}(t). \\ iC_{dc}(t) = C_{dc} \frac{dU_{dc}(t)}{dt} = -i_s(t). \end{cases} \quad (2.19)$$

$0 < t < \alpha_{K1}T.$

$$\begin{cases} V_{Lbat}(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = V_{bat}(t) - U_{dc}(t). \\ iC_{dc}(t) = C_{dc} \frac{dU_{dc}(t)}{dt} = i_{Lbat}(t) - i_s(t). \end{cases} \quad (2.20)$$

$\alpha_{K1}T < t < T.$

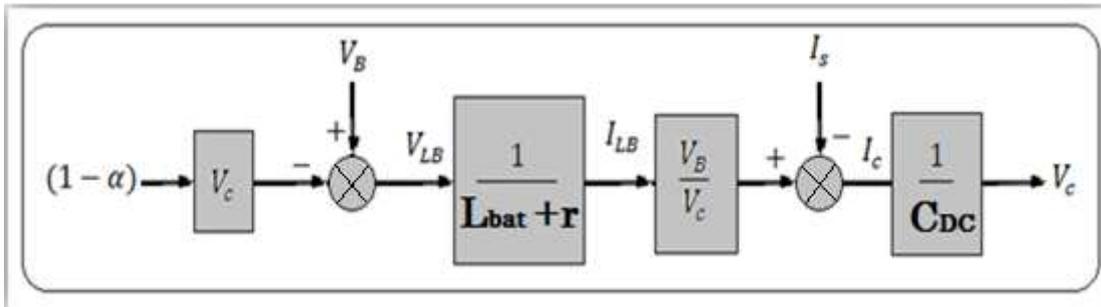
En utilisant le principe de la valeur moyenne, on peut déduire Le modèle moyen de ce convertisseur qui est décrit par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \\ iC_{dc}(t) = C_{dc} \frac{dU_{dc}(t)}{dt} \end{cases} \stackrel{+}{=} \begin{cases} -(1 - \alpha) U_{dc}(t) + U_{bat}(t). \\ (1 - \alpha) i_{Lbat}(t) - i_s(t). \end{cases} \quad (2.21)$$

La relation entre U_s et U_d est : $V_{bat} = \frac{\alpha}{1-\alpha} U_{dc}$ avec α le rapport cyclique.

Le convertisseur peut être modélisé en exploitant seulement la première configuration qu'on va l'utiliser dans la partie commande par PI et mode glissant (Le signe « - » représente le changement du sens du courant), cette configuration est similaire à celle d'un hacheur élévateur qui est déjà étudié dans la partie précédente.

Si on considéré I_s comme une perturbation et V_B constante, on construit le schéma suivant :



2.5. Dimensionnement des éléments passifs des hacheurs et du bus continu:

Il est très important de dimensionner les deux (02) convertisseurs précédents pour avoir un bon fonctionnement du système et une bonne interconnexion avec le bus continue, et nous admettons que la capacité de ce dernier est suffisamment grande et tous les semi-conducteurs sont parfaits (sans perte) pour que la tension de bus continue puisse être considérée constante au cours de la période. Les expressions mathématiques permettant de dimensionner les inductances de lissage du courant et les capacités de filtrage de la tension, elles sont obtenues à partir des équations du modèle moyen du hacheur survolteur (les expressions de la tension et courant) [24]. Et voici la figure qui présente l'allure des signaux du hacheur survolteur dans le mode de conduction statique continue :

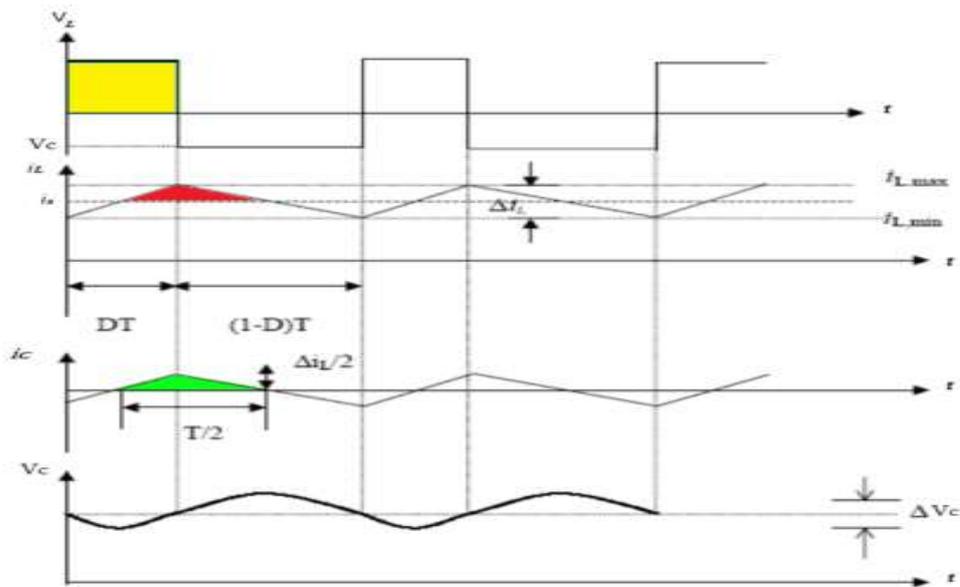


Figure 2.15 : Allure des signaux du hacheur survolteur en condition continue.

En admettant que les ondulations relatives admissibles de tension et de courant sont:

$$\begin{cases} \frac{\Delta i_l}{i_l} = 10 \% \\ \frac{\Delta v}{v} = 3 \% \end{cases}$$

2.5.1. Ondulation du courant et de la tension :

2.5.1.1. Ondulation du courant :

L'ondulation de la tension dépend de la valeur de la capacité (C), et l'ondulation du courant dépend de la valeur de l'inductance (L). L'ondulation Δi_l est la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale du courant ce qui donne :

$$\Delta i_l = \frac{1}{L} * \frac{\alpha \cdot U_{dc} \cdot (1-\alpha)}{f_c} \quad (2.22)$$

Sachant que l'ondulation est maximale pour $\alpha = 0.5$ on aura :

$$\Delta i_l = \frac{1}{L} * \frac{U_{dc}}{4 \cdot f_c} \quad (2.23)$$

Cette relation permet de déterminer la valeur à donner (L) pour que l'ondulation maximale reste inférieure à un seuil donnée :

$$L \geq \frac{1}{\Delta i_{lmax}} * \frac{U_{dc}}{4 \cdot f_c} \quad (2.24)$$

Avec f_c : fréquence de commutation.

2.5.1.2. Ondulation de la tension

- L'ondulation (ΔU_{dc}) de la tension U_{dc} dépend de la valeur de la capacité (C) On a :

$$\Delta U_{dc} = \frac{i_l}{C \cdot f_c} \cdot (1 - \alpha)^2 \quad (2.25).$$

L'ondulation est maximale pour $\alpha = 0.5$ on aura :

$$C \geq \frac{i_{lmax}}{4 \cdot f_c \cdot \Delta U_{dc max}} \quad (2.26)$$

- Et pour la capacité C_{pv} leur valeur dépend de l'ondulation (ΔU_{pv}) de la tension U_{pv} et en admettant que le courant fourni par le GPV est constant, on peut écrire :

$$\Delta U_{pv} = \frac{\alpha}{C1 \cdot f_c} \cdot (i_{pv} - \Delta i_l) \quad (2.26)$$

L'ondulation absolue maximale a lieu pour un rapport cyclique $\alpha = 1$:

$$\Delta U_{pv max} = \frac{(i_{pv} - \Delta i_l)}{C1 \cdot f_c} \quad (2.27)$$

$$\text{Donc : } C1 \geq \frac{(i_{pv} - \Delta i_l)}{\Delta U_{pv max} \cdot f_c} \quad (2.28)$$

La détermination des valeurs des éléments passifs des convertisseurs *DC-DC*, s'appuyer sur le mode de connexion des éléments de chaque source (panneau solaire et batterie), les panneaux sont regroupés en série en nombre de huit (08) (un champ de 2KW). Ainsi que la tension du bus continu est fixée à 800V.

Donc en appliquant les relations développées précédemment, on peut trouver :

$$\begin{cases} L = L_{bat} = 0.25 H. \\ C = 1000 \mu F \\ C1 = 220 \mu F \end{cases} \quad (2.28)$$

2.6. Convertisseur DC-AC :

Les convertisseurs de courant continu en courant alternatif sont appelés des onduleurs. La fonction d'un onduleur est de convertir une tension continue d'entrée en une tension de sortie alternative symétrique d'amplitude et de fréquence désirée. La tension de sortie variable peut être obtenue en variant la tension continue d'entrée et en maintenant le gain de l'onduleur constant.

D'autre part, si la tension d'entrée est fixe et qu'elle soit non contrôlable, une tension de sortie variable peut être obtenue en variant le gain de l'onduleur. Il y a plusieurs techniques pour obtenir cette variation, la technique de modulation des largeurs d'impulsions MLI est la plus répandue. Elle consiste à changer la largeur des impulsions de la tension de sortie avec des commandes appropriées des interrupteurs à semi-conducteurs de l'onduleur.

Le gain de l'onduleur peut être défini comme le rapport entre la tension alternative de sortie et la tension continue d'entrée. La forme d'onde de la tension de sortie d'un onduleur idéal doit être sinusoïdale.

Cependant, cette forme d'onde n'est pas sinusoïdale en pratique et contient quelques harmoniques. Ce qui veut dire qu'il existe des harmoniques de tension. Le but serait donc d'obtenir à la sortie un signal avec un taux de distorsion harmonique le plus faible possible [6][7].

2.6.1. Présentation de l'onduleur :

La conversion continue alternative a pour rôle la transformation d'un signal de tension continu en un signal de tension alternatif d'amplitude et de fréquence désirées. Les onduleurs triphasés sont normalement utilisés pour les applications de grande puissance.

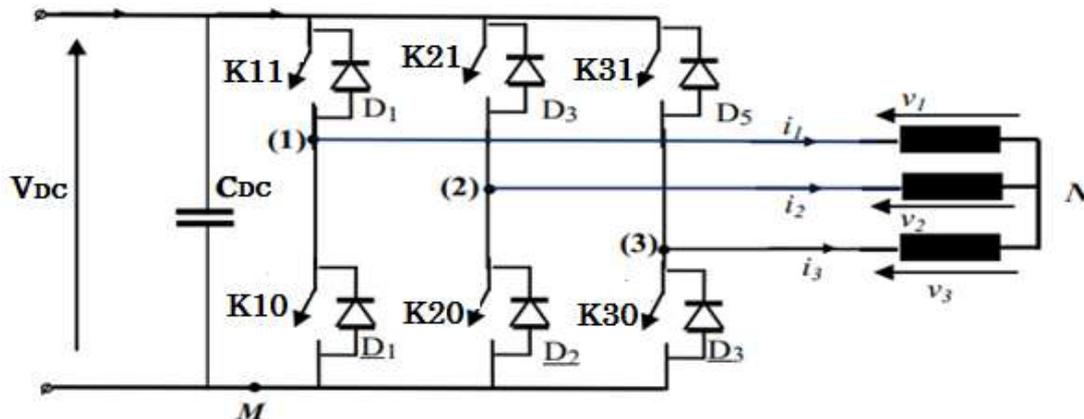


Figure 2.16: Onduleur MLI triphasé de tension.

2.6.2. Description et fonctionnement de l'onduleur triphasé :

L'onduleur triphasé est constitué d'interrupteurs bidirectionnels en courant qui sont réalisés par des semi-conducteurs commandables à l'ouverture et à la fermeture (de type IGBT dans la majorité des cas) montés en antiparallèle avec une diode. Pour cette structure, on doit respecter les contraintes suivantes :

- A un instant donné, un seul interrupteur d'un même bras doit conduire afin d'éviter tout court-circuit de la source de tension.
- Le courant de ligne doit toujours trouver un chemin possible d'où la mise en antiparallèle de diodes au niveau des interrupteurs.

En théorie, nous commandons les deux semi-conducteurs d'un même bras de façon complémentaire : la conduction de l'un entraîne le blocage de l'autre. En pratique, les deux semi-conducteurs d'un même bras ne doivent jamais conduire en même temps afin d'éviter de court-circuiter la source de tension ; il faut donc générer un temps d'attente, également appelé temps mort, entre la commande au blocage d'un interrupteur et la commande à l'amorçage de l'autre interrupteur du même bras [6] [7].

Par conséquent, quand $S_i = 1$, le point de sortie (i) de l'onduleur est connecté à la borne + de la source DC, conduisant à une tension du bras $V_{iM} = U_{dc}$ et quand $S_i = 0$, le point de sortie (i) de l'onduleur est connectée à la borne - de la source DC, conduisant à une tension du bras $V_{iM} = 0$. Par conséquent cet onduleur est classé à deux niveaux [11].

2.6.3. Modélisation vectorielle de l'onduleur :

D'une façon générale la tension V_{iM} du bras i est exprimée par : $V_{iM} = S_i \cdot U_{dc}$ avec : $S_i \in [1 \ 0]$ et $i = (1, 2, 3)$.

Le récepteur étant couplé en étoile, Comme les tensions de phase V_{1n} , V_{2n} et V_{3n} , doivent formées un système triphasé équilibré par conséquent on a :

$$(V_{1n} + V_{2n} + V_{3n}) = 0 \quad (2.29)$$

Également, la relation entre tensions des trois bras de l'onduleur V_{1M} , V_{2M} et V_{3M} et les tensions de phase V_{1n} , V_{2n} et V_{3n} est donnée par:

$$V_{1M} + V_{2M} + V_{3M} = 3V_{nM} + (V_{1n} + V_{2n} + V_{3n}) \quad (2.30)$$

$$D'où : V_{nM} = \frac{V_{1M} + V_{2M} + V_{3M}}{3} \quad (2.31)$$

Et les tensions simples sont alors :

$$\begin{aligned} V_{1n} &= + \frac{2}{3} V_{1M} - \frac{1}{3} V_{2M} - \frac{1}{3} V_{3M} = \left(+ \frac{2}{3} S_1 - \frac{1}{3} S_2 - \frac{1}{3} S_3 \right) U_{dc} \\ V_{2n} &= - \frac{1}{3} V_{1M} + \frac{2}{3} V_{2M} - \frac{1}{3} V_{3M} = \left(- \frac{1}{3} S_1 + \frac{2}{3} S_2 - \frac{1}{3} S_3 \right) U_{dc} \\ V_{3n} &= - \frac{1}{3} V_{1M} - \frac{1}{3} V_{2M} + \frac{2}{3} V_{3M} = \left(- \frac{1}{3} S_1 - \frac{1}{3} S_2 + \frac{2}{3} S_3 \right) U_{dc} \end{aligned} \quad (2.32)$$

Ces trois relations peuvent s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{pmatrix} V_{1n} \\ V_{2n} \\ V_{3n} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} U_{dc} \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{pmatrix} \quad (2.33)$$

Les tensions entre phase sont données par :

$$\begin{cases} U_{12} = V_{1n} - V_{2n} \\ U_{23} = V_{2n} - V_{3n} \\ U_{31} = V_{3n} - V_{1n} \end{cases} \quad (2.34)$$

Donc on a 3 signaux de commandes S_1 , S_2 et S_3 , ces commandes conduisent à $2^3 = 8$ états de commutations lesquelles sont listées au tableau où sont données également les tensions de bras V_{iM} et les tensions de phase par rapport à V_{iM} [8].

Etats de commutation	Ordre de commande			Tensions de phases			Tensions de bras		
	S_1	S_2	S_3	V_{1n}	V_{2n}	V_{3n}	V_{1M}	V_{2M}	V_{3M}
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	1	0	0	2/3	-1/3	-1/3	U_{dc}	0	0
3	1	1	0	1/3	1/3	-2/3	U_{dc}	U_{dc}	0
4	0	1	0	-1/3	2/3	-1/3	0	U_{dc}	0
5	0	1	1	-2/3	1/3	1/3	0	U_{dc}	U_{dc}
6	0	0	1	-1/3	-1/3	2/3	0	0	U_{dc}
7	1	0	1	1/3	-2/3	1/3	U_{dc}	0	U_{dc}
8	1	1	1	0	0	0	U_{dc}	U_{dc}	U_{dc}

Tableau 2.1 : les vecteurs de tension pour les huit états de l'onduleur [9]

2.7.Modélisation et dimensionnement des éléments passifs du filtre de sortie de l'onduleur :

L'idée est de placer le gabarit du filtre de telle sorte que les harmoniques engendrés par la MLI soient suffisamment atténués. Cette atténuation est simplifiée par le fait que les harmoniques de rang faible peuvent être supprimés dans la plupart des techniques MLI [26].

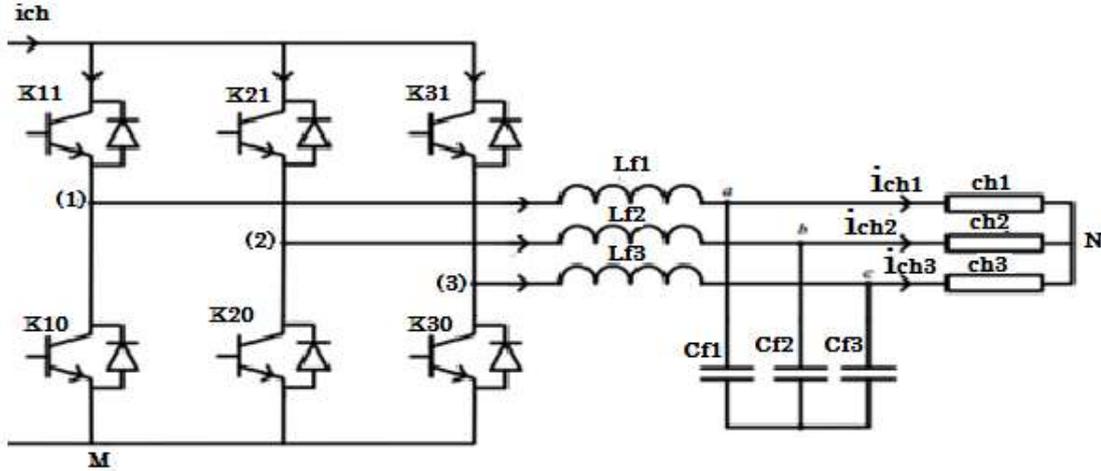


Figure 2.17 : L'onduleur avec le filtre LC et la charge triphasé.

En négligeant le courant de charge et en appliquant la loi des mailles sur la Figure on trouve :

$$\begin{cases} i_c(t) = i_L(t) = C \cdot \frac{dv_c(t)}{dt} \\ v_c(t) = v_{AN}(t) - v_L(t) = v_{AN}(t) - r_L \cdot i_L(t) - L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} \end{cases} \quad (2.35)$$

En remplaçant le courant i_L par son expression donnée par la relation précédente on trouve :

$$v_c(t) = v_{AN}(t) - r_L \cdot C \cdot \frac{dv_c(t)}{dt} - L \cdot C \cdot \frac{d^2v_c(t)}{dt^2} \quad (2.36)$$

On peut déterminer les éléments en plaçant le gabarit du filtre passe bas.

La fonction de transfert du filtre LC est la suivante :

$$T(s) = \frac{v_c}{v_{AN}} = \frac{1}{1 + r_L \cdot C \cdot s + L \cdot C \cdot s^2} \quad (2.37)$$

La pulsation de coupure de cette fonction de transfert est :

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (2.38)$$

Donc la fréquence de coupure est définie par la relation suivante :

$$f_n = \frac{1}{2 * \pi * \sqrt{L \cdot C}} \quad (2.39)$$

La détermination du couple $\{L, C\}$ se fait alors à partir de l'expression suivante en s'imposant une atténuation en décibels à la pulsation désirée.

$$T(s)_{db} = -20 * \log \left(\sqrt{(1 - L.C.W^2)^2 + (r.C.W)^2} \right) \quad (2.40)$$

Si l'on trace le lieu de bode d'une transmittance du second ordre, avec $w_0 = 1 \text{ rad.s-1}$ et ζ prenant les valeurs 0.1, 0.3, 0.707, 1, 10 et 40, on remarque qu'à partir d'une fréquence égale à 5 fois la fréquence propre du système f_0 , le gain est toujours inférieur à -26 dB quel que soit la valeur du coefficient d'amortissement ξ (Fig. ??). On peut choisir par exemple de caler le filtre tel que $5.f_0$ soit égale à la fréquence centrale du premier paquet d'harmoniques à éliminer [22] [27].

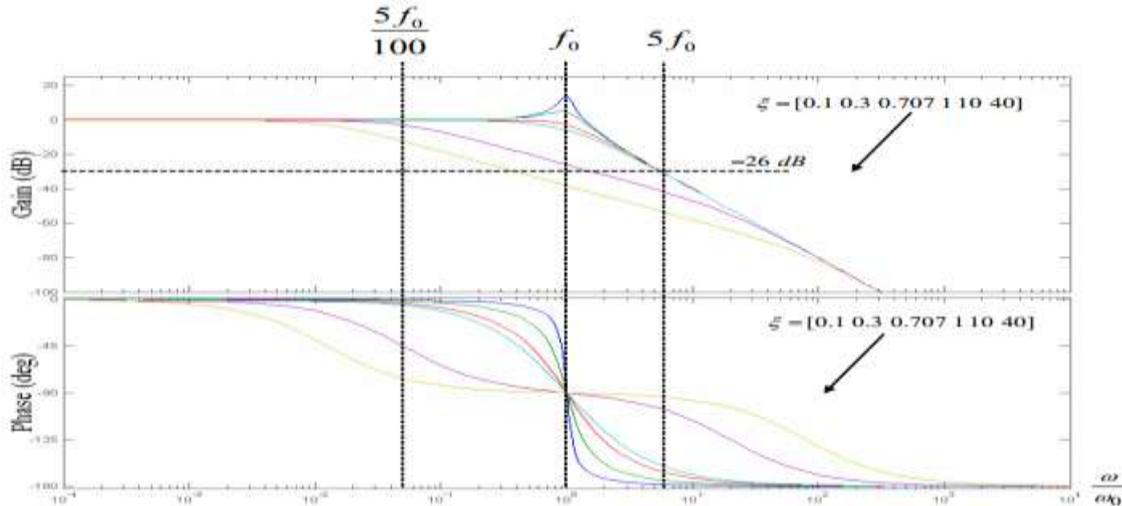


Figure 2.17 :

Diagramme de Bode de système du second ordre.

Si on choisit $f = 50\text{HZ}$ avec $\zeta = 0.7$ on trouve -28 dB à $5.f$

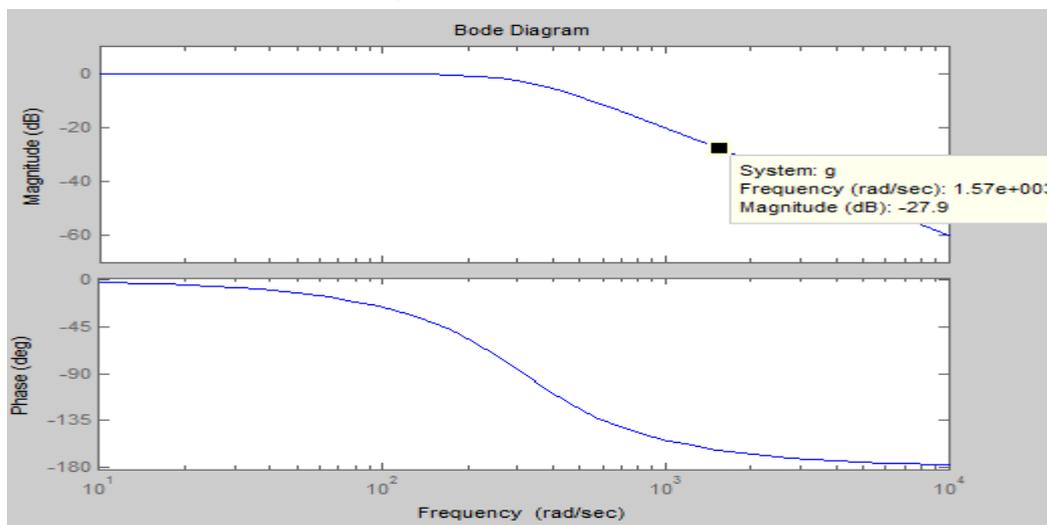


Figure 2.18 : Diagramme de Bode de système du second ordre $f = 50\text{HZ}$ avec $\zeta = 0.7$.

Si on choisit de caler le filtre tel que $5.f$ soit égale à la fréquence centrale du premier paquet d'harmoniques, on arrivera à atténuer ces harmoniques de -28dB . On peut déduire les valeurs numériques pour chaque élément du filtre LC , en connaissant la fréquence des signaux et en imposant l'un de ces éléments. Dans notre cas on prend :

$$\begin{cases} f = 50 \text{ HZ} \\ C = 100 \text{ uF} \end{cases} \rightarrow \begin{cases} L = 4 \text{ mH} \text{ on suppose que la resistance interne est de } 0.2\Omega \end{cases}$$

Conclusion :

A travers ce chapitre, on a présenté la modélisation de toute la chaîne photovoltaïque, à partir du GPV, hacheur BOOST, ainsi que le hacheur BUCK-BOOST (réversible en courant) et leur fonctionnement dans les deux sens (charge / décharge de la batterie). Ces deux convertisseurs sont très importants dans notre système car les deux jouent le rôle d'aider le GPV. Le premier hacheur avec sa commande permet de maximiser l'énergie et le deuxième avec la batterie et sa commande aident ou remplacent le GPV pendant les moments critiques et le service pendant la nuit. Encore on a modélisé l'onduleur triphasé et son filtre qui sont connectés à une charge isolée.

Dans le chapitre qui suit, nous aborderons toutes les commandes qu'on applique à notre chaîne MPPT, PI, mode glissant et les commandes MLI, Enfin on présente un algorithme de gestion d'énergie globale de notre système pour optimiser le fonctionnement de la chaîne PV.

Chapitre 03 :

Commande et simulation de la chaine photovoltaïque.

Introduction :

Dans notre chaine, on a trois convertisseurs de puissance qu'on va établir leur commandes, ce chapitre est destiné à illustrer ces commandes en détail, en montrant les différentes stratégies et raisonnements utilisés, ainsi qu'on donnera des interprétations pour apparaître les avantages de chaque commande. Dans chaque partie de ce chapitre, on doit tester nos commandes, en simulant le système sous l'environnement Matlab/Simulink.

Pour finir ce chapitre on va proposer un algorithme de gestion d'énergie, où on gère l'énergie mise en jeu entre les différents étages de la chaine PV, afin d'obtenir la meilleur continuité de service et pour protéger les batteries de stockage.

3.1.Commande de l'étage d'adaptation (Boost).**3.1.1. La Commande MPPT (Maximum Point Power Tracker):**

Vu le changement des conditions climatiques de l'environnement qui va affecter la puissance de sortie du générateur photovoltaïque. Des lois de commandes spécifiques existent pour amener nos dispositifs de conversion d'énergie renouvelable à fonctionner aux maximums de leurs caractéristiques sans connaissance préalable de ces points de fonctionnement ni les instants ou les raisons de ce changement.

Pour optimiser le rendement énergétique d'un GPV d'après leurs caractéristiques présentées dans les différentes sources renouvelables, qui présente un point de fonctionnement optimal, correspondant à un certain point de coordonnées « VMPP » pour la tension et « IMPP » pour le courant où la puissance est maximale. Ce point n'est jamais constant dans le temps, car il dépend du niveau d'ensoleillement et de la température des cellules mais pas de la charge. Il existe plusieurs algorithmes MPPT présentés dans la littérature [14] [15] [16].

Dans cette section nous nous intéressons à la méthode de perturbation et d'observation (P&O), et à la méthode d'incrémentation de la conductance (IC).

3.1.1.1.Méthode de perturbation et d'observation (P&O) :

C'est la méthode la plus utilisée dans la pratique à cause de la simplicité de son algorithme, et donc la facilité de son implémentation.

L'algorithme P&O comme son nom l'indique, consiste à incrémenter selon un pas positif ou négatif fixé, la tension de référence des panneaux afin de "perturber" le système, et d'observer si la puissance photovoltaïque croît ou décroît en réponse. Dans le premier cas, cela signifie que la référence évolue dans le bon sens, et le pas continu à être ajouté à la référence avec le même signe. Dans le second, l'algorithme évolue dans le mauvais sens, et le pas est changé de signe pour retrouver une puissance croissante. Arrivé au sommet de la caractéristique de puissance, le point de fonctionnement doit, alors osciller autour de la puissance maximale avec une amplitude correspondant au pas imposé [22] [17].

Ce principe est schématisé dans la figure (3.1)

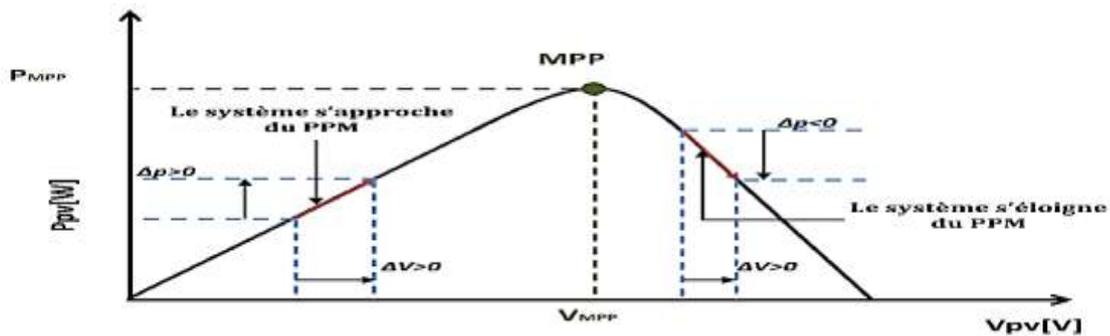


Figure 3.1 : Caractéristique $[P_{pv} - V_{pv}]$ d'un panneau photovoltaïque pour une irradiation fixe et une température constante.

Dans cet algorithme la tension du panneau PV est perturbée avec une petite incrémentation, le changement de puissance résultant ΔP est observé [18] :

- Si ΔP est positif, donc ça veut dire qu'on s'approche du PPM. Ainsi, d'autres perturbations dans la même direction vont déplacer le point de fonctionnement vers le PPM.
- Si ΔP est négatif le point de fonctionnement est déplacé loin du PPM, et la direction de la perturbation doit être inversée pour avancer vers le PPM.

Et voici l'organigramme de l'algorithme P&O :

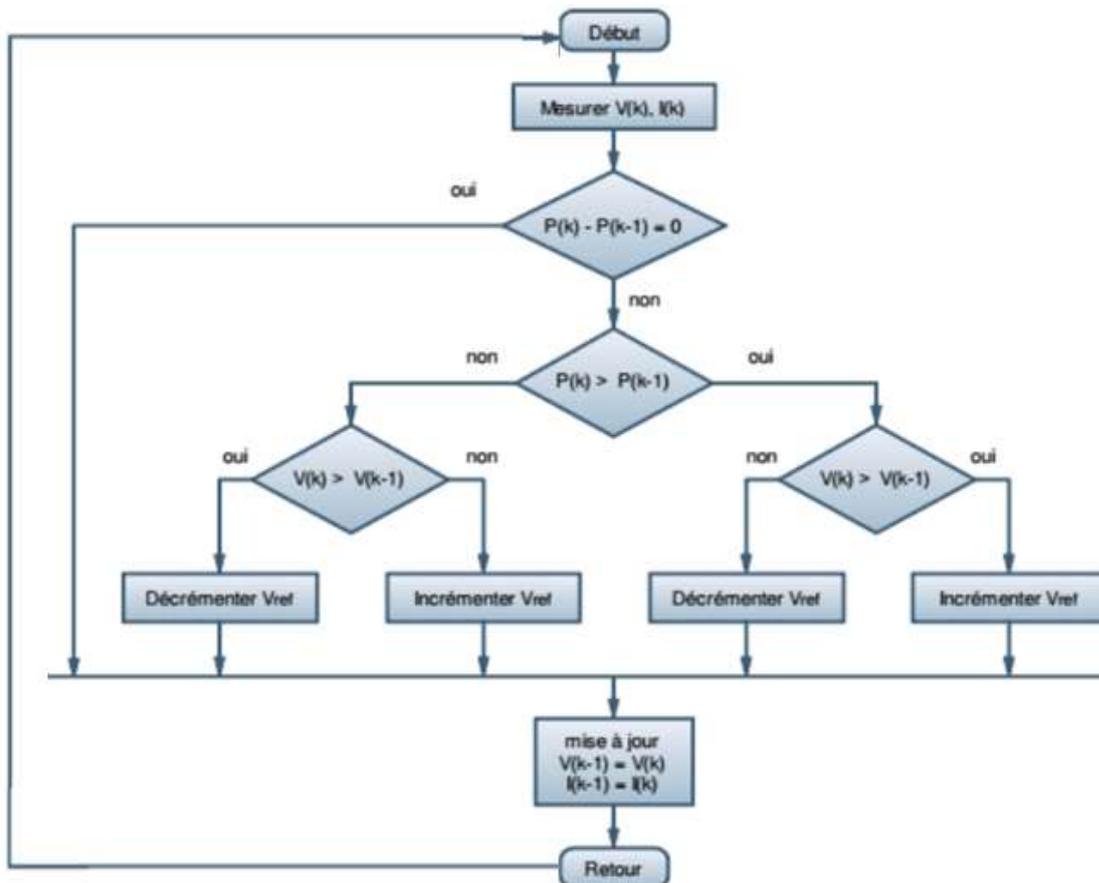


Figure 3.2 : L'organigramme de l'algorithme P&O

3.1.1.2.Méthode D'incrémentation de la conductance IC :

L'idée de base de cet algorithme vient du fait que la pente de la courbe s'annule au point de puissance maximale, comme le montre la figure II. 7. Donc on calcule la dérivée de la puissance de sortie du panneau .cette dérivée $\frac{dP}{dV}$ est nulle au MPP positive ($\frac{dP}{dV} > 0$) à gauche et négative ($\frac{dP}{dV} < 0$) à droite donc on peut connaître la position relative du point de fonctionnement.

La puissance du panneau solaire est donnée par : $P = V * I$.

La dérivée partielle est donnée par : $\frac{dP}{dV} = I \cdot \frac{dV}{dV} + V \cdot \frac{dI}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV}$. On définit la conductance de la source $G = I / V$ et l'incrémentale conductance $\Delta G = dI / dV$.

On peut connaître facilement la position relative du point de fonctionnement par :

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV} = 0 \iff \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \iff \Delta G = -G \implies \text{Le point est au PPM.} \\ \frac{dP}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV} > 0 \iff \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \iff \Delta G > -G \implies \text{Le point est à gauche de PPM.} \\ \frac{dP}{dV} = I + V \cdot \frac{dI}{dV} < 0 \iff \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \iff \Delta G < -G \implies \text{Le point est à droite de PPM} \end{cases}$$

Et voici l'organigramme de l'algorithme IC :

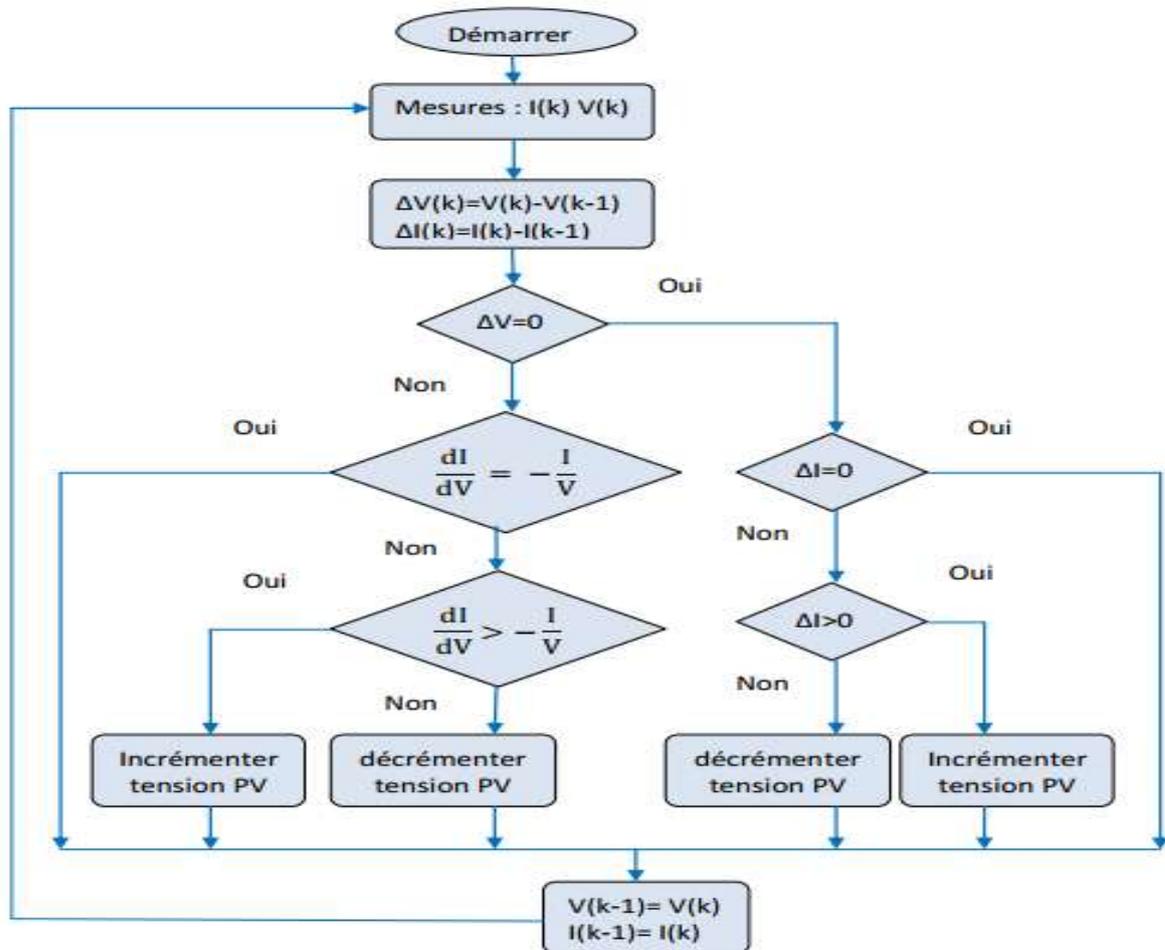


Figure 3.3 : L'organigramme de l'algorithme IC.

Lorsque le MPP est atteint dans les précédents cycles ou par une stabilisation du point de fonctionnement et pour éviter que la différentielle dV de la tension du panneau devienne nulle ce qui conduirait à une division par zéro .l'algorithme fait un test de dV . S'il est nul il teste si le $dI = 0$ (l'irradiation n'est pas changé) si c'est le cas alors le PPM est atteint et l'algorithme ne fait aucun changement .dans le cas contraire l'algorithme teste le signe dI (augmentation ou diminution de l'irradiation) pour déterminer la position du PPM et ajuster la tension de référence correspondante.

L'avantage de cet algorithme est qu'il n'oscille pas autour du MPP à cause du test de $dI=0$, l'algorithme se stabilise une fois le MPP atteint et le signe de dI donne la vraie direction à suivre pour le tracking du MPP .

Dans la pratique, la condition $dP/dV = 0$ (où $dI/dV = -I/V$) est rarement arrivée, à cause des approximations dans le calcul des dI et dV . Ainsi, une petite marge d'erreur doit être autorisée. Par exemple $dP/dV = +E$, la valeur de E est optimisée tenant compte de l'erreur induite en régime permanent, et aussi du risque d'oscillation du point de fonctionnement [17] [22] [23].

3.1.2. Résultats de la simulation :

Pour confirmer l'ensemble des commandes illustrées dans le présent chapitre, en variant l'irradiation sans changer la température car leur influence sur la puissance est très réduite, des simulations ont été effectuées avec le logiciel MATLAB/SIMULINK à travers un bloc (Signal/Builder). Le block du PV sous Simulink est représenté dans la figures :

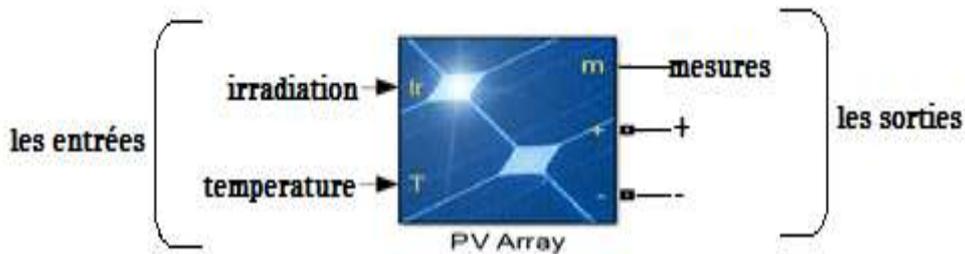


Figure 3.4 : Modèle sous SIMULINK du panneau photovoltaïque.

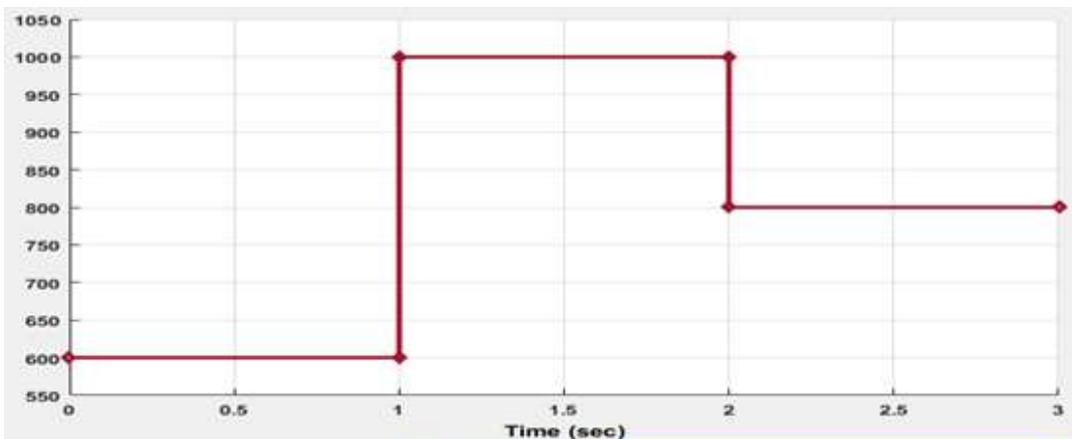


Figure 3.5 : Evolution de profil de l'éclairement (en W/m^2) du PV « signal Builder ».

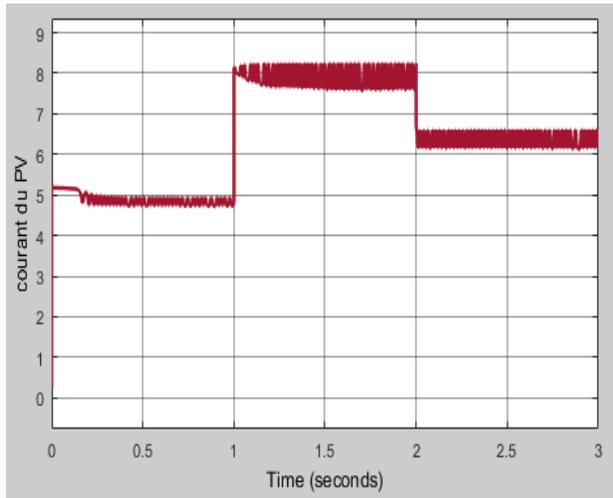


Figure 3.6 : Evolution du courant du PV(en A).

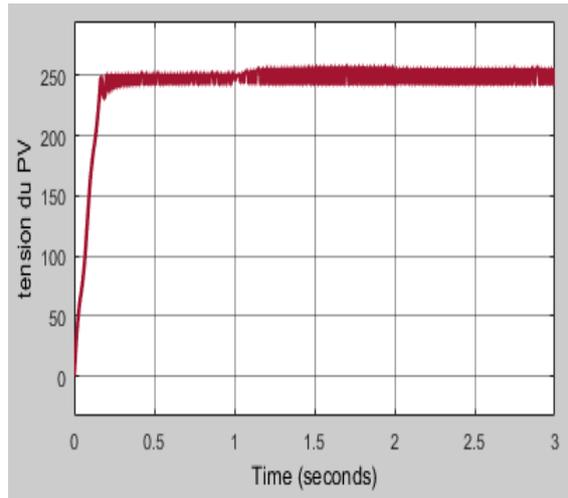


Figure 3.7: Evolution de la tension du PV(en V).

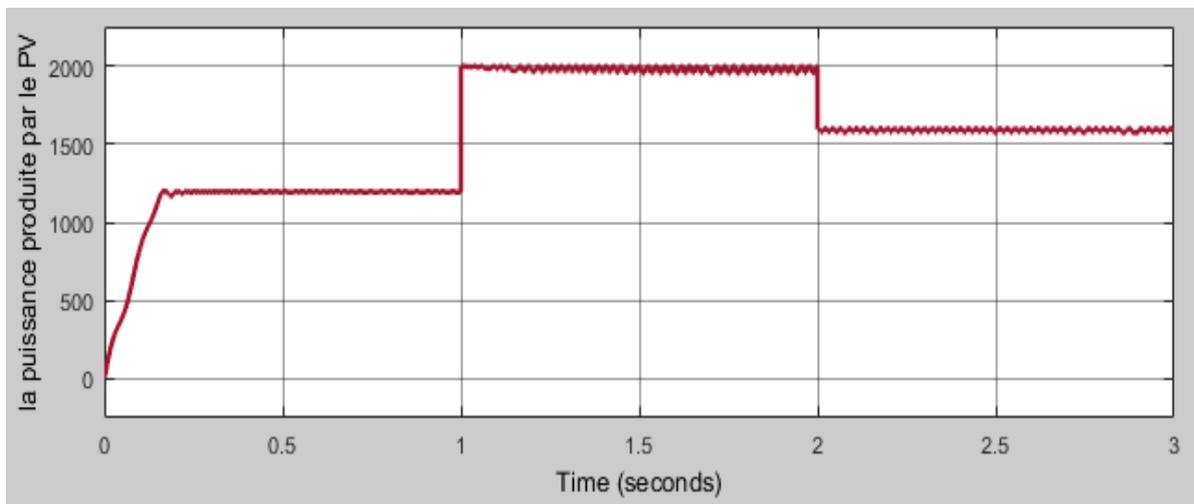


Figure 3.8 : Evolution de la puissance (en W) du générateur PV

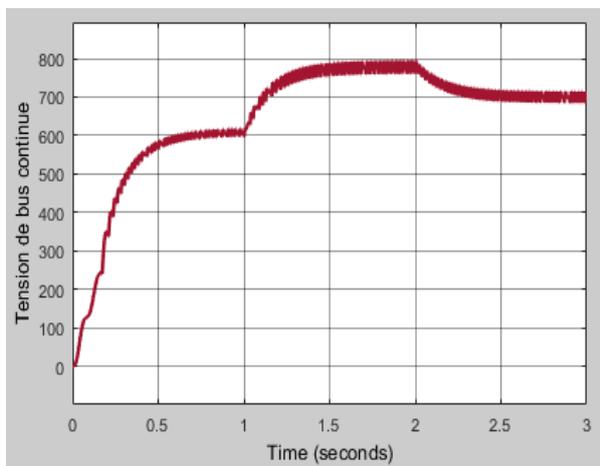


Figure 3.9 : Evolution de la tension du bus continu (en V)

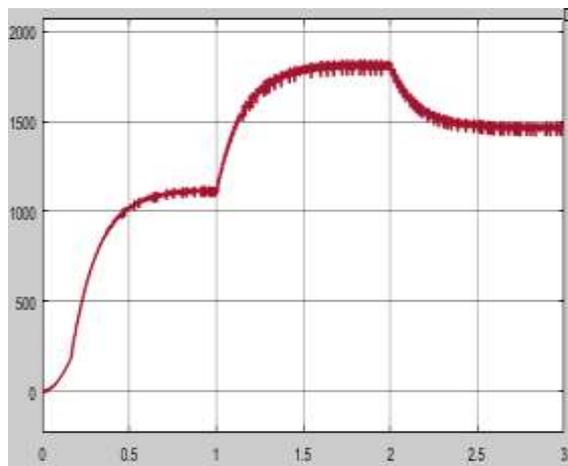


Figure 3.10 : Evolution de la puissance consommée par la charge (en W).

3.1.3. Interprétation des résultats:

D'après les résultats de simulation (la figure 3.6 et 3.7), nous remarquons que la variation du courant du générateur PV est proportionnel à la variation de l'éclairement par contre la tension reste constant (varie légèrement) car la température est constante (mais s'il Ya une variation dans la température on voit la variation de la tension).

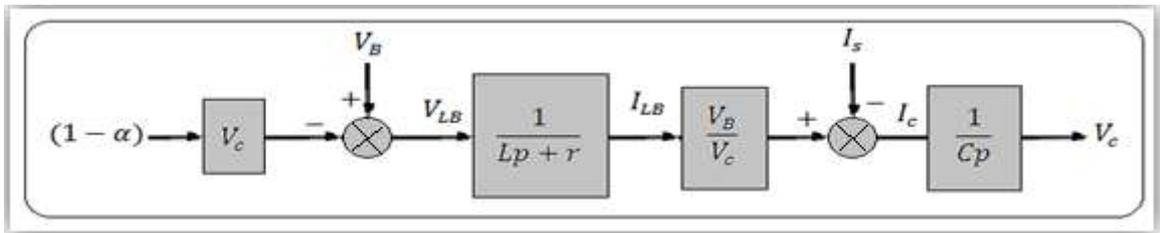
Pour la figure 3.8, qu'il représente l'évolution de la puissance du PV qui est proportionnelle à la variation du courant (l'éclairement) .

Pour la figure 3.9, on remarque que la puissance fournie par le PV à travers l'MPPT dépend des conditions météologique, ce qui traduit par la variation du rapport cyclique, ce dernier influence à la tension de la sortie du hacheur boost (la tension du bus continu), d'autres part la tension du bus continu dépend indirectement de la variation de l'éclairement.

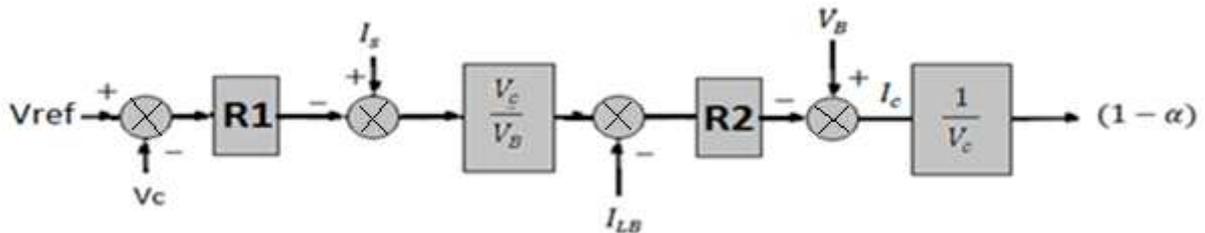
3.2. Commande de l'étage d'adaptation (Buck-Boost).

3.2.1. La commande par PI :

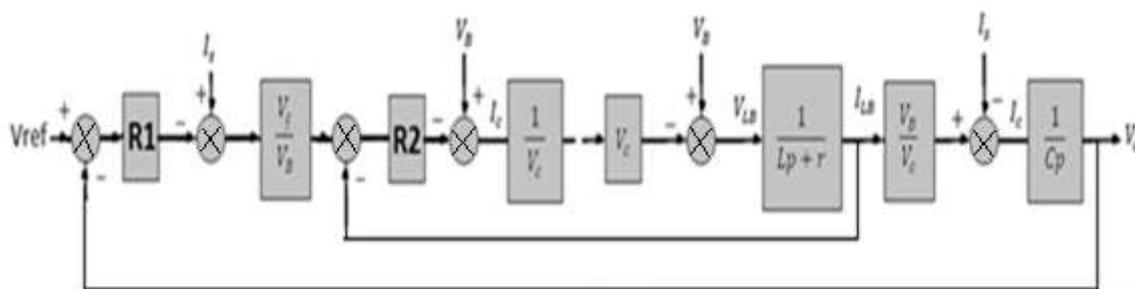
Le schéma fonctionnel du hacheur construit à partir de son modèle moyen est comme suit :



On ne peut pas construire un modèle systématiquement, donc on a besoin d'un régulateur de modèle comme le suivant :

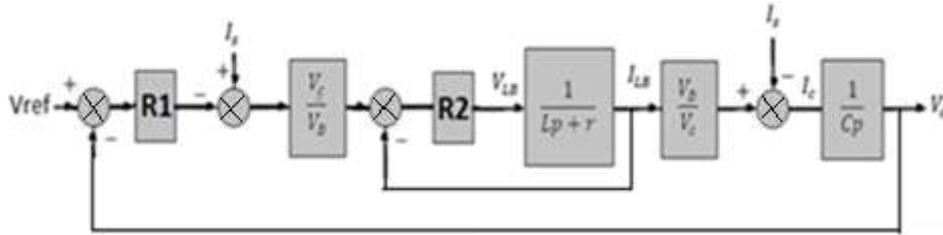


Ce modèle est construit comme étant l'inverse du modèle du hacheur où on a 2 boucles tel que le régulateur R1 sert à réguler la tension du Bus continu (boucle externe), et R2 sert à réguler le courant qui traverse la bobine (boucle interne). Donc c'est une régulation en cascade



3.2.1.1.Synthèse du régulateur:

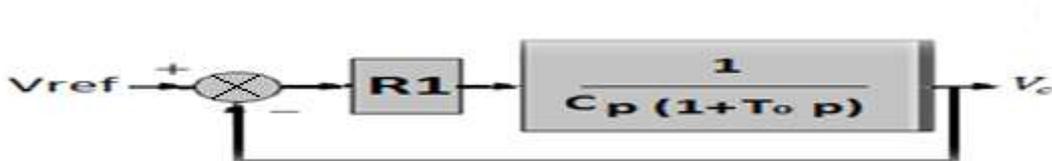
Le système avec régulateur :



R2 est de type PI consiste à annuler l'erreur statique et donc :

$$R_2 = K_p \frac{1 + T_i p}{T_i p} \quad \text{avec} \quad \begin{cases} T_i = L/r \\ K_p = 3r/2 \end{cases}$$

Après l'injection de ce régulateur le système corrigé devient :



Ce système déjà contient un intégrateur donc R1 est de type proportionnel. La fonction de transfert du système en boucle fermée est :

$$F(p) = \frac{1}{\frac{T_0 C}{K_p} p^2 + \frac{C_p}{K_p} p + 1} = \frac{1}{\frac{1}{\omega_n^2} p^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} p + 1} \quad (3.1)$$

Pour un $\xi = 0.7$ optimale le $K_p = \frac{C \omega_n}{2\xi}$ avec $\omega_n = \frac{1}{2\xi T_0}$.

3.2.1.2.Résultats de la simulation : on utilise le même courbe d'irradiation qu'on a utilisé précédemment

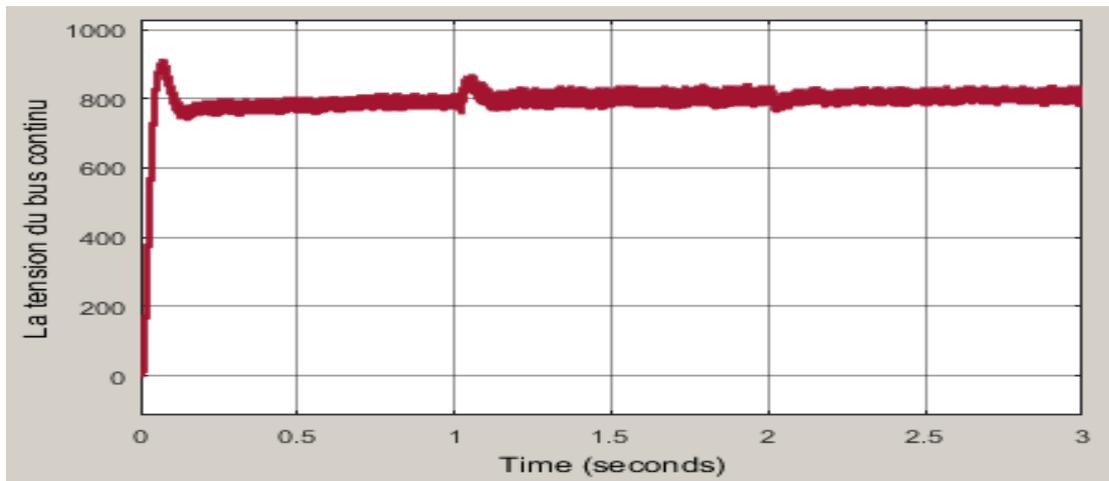


Figure 3.11 : La tension du bus continu

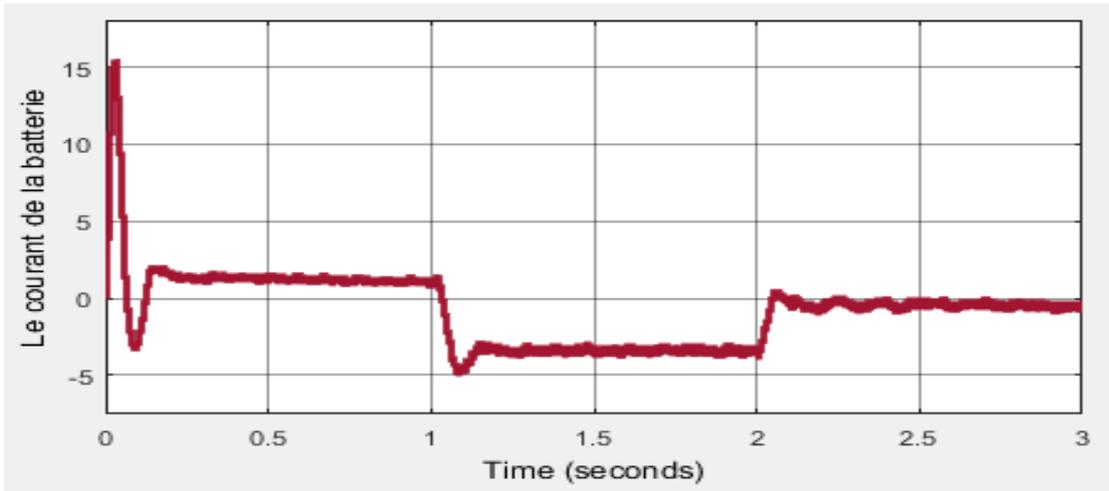


Figure 3.12 : Le courant de la batterie (en A)

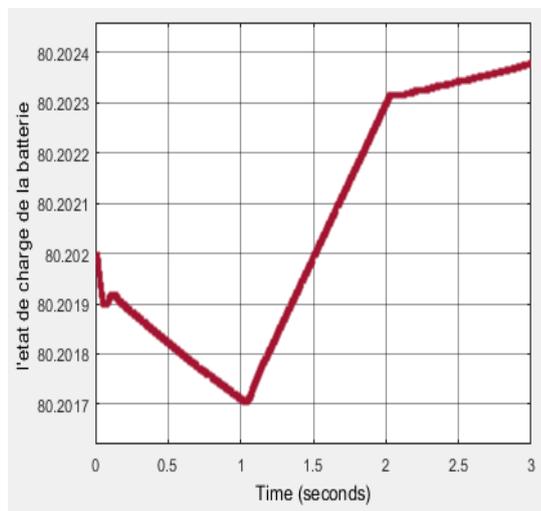
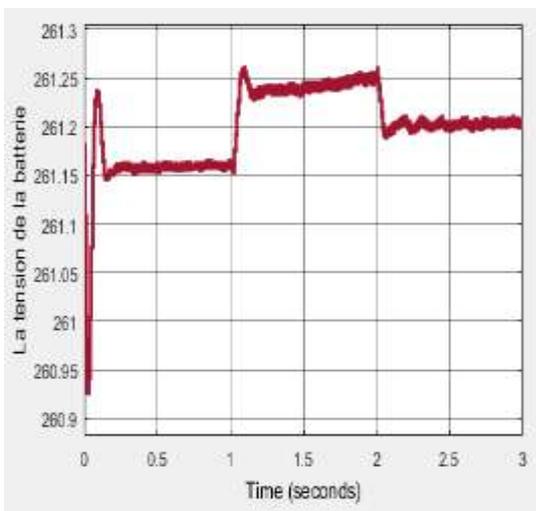


Figure 3.13 : La tension de la batterie(V). Figure 3.14 : L'état de charge de la batterie (A).

Interprétations des résultats:

D'après la figure 3.11 on remarque que le régulateur stabilise la tension du bus continu à 800 volts.

D'après la figure 3.12, on remarque que le courant de la batterie est positif dans la partie [0,1]. Donc la batterie se décharge car la puissance fournit par le GPV et moins que la puissance demandé par la charge, par contre entre 1 et 2 le courant est négatif car la puissance fournit par le GPV et plus que la puissance demandé par la charge, et enfin entre [2,3] le courant est presque nul car la puissance fournit par le GPV est presque la même demandé par la charge. Et ceci est du à cause de la réversibilité du courant de l'hacheur buck-boost.

D'après la figure 3.13 et 3.14 la tension et l'état de charge de la batterie sont compatibles avec les résultats du courant.

3.2.2. La commande par mode glissant :

La commande par mode glissant (Sliding Mode Control, SMC) est un contrôle de type non linéaire qui a été introduit pour le contrôle des systèmes à structure variable (comme le convertisseur) et il se base sur le concept de changement de structure du contrôleur avec l'état

du système afin d'obtenir une réponse désirée. La commande par mode glissant est donc du type tout ou rien.

L'idée est de diviser l'espace d'état par une frontière de décision appelée surface de glissement. L'objectif est d'arriver à l'état de référence, une fois que l'état du système atteint la surface de glissement (Figure 3.15).

Premièrement, pour atteindre cet objectif, il faut assurer l'attractivité de la surface de glissement. En d'autre terme il faut que l'état du système dans n'importe quelle position de l'espace d'état se dirige vers la surface de glissement. Deuxièmement, une fois la surface atteinte, il faut assurer le glissement le long de cette surface et la stabilité du système, pour rejoindre la référence. Pour cela, il faut trouver la condition sous laquelle la dynamique du système glisse sur la surface vers l'état de référence désiré, (Figure 3.15) [20].

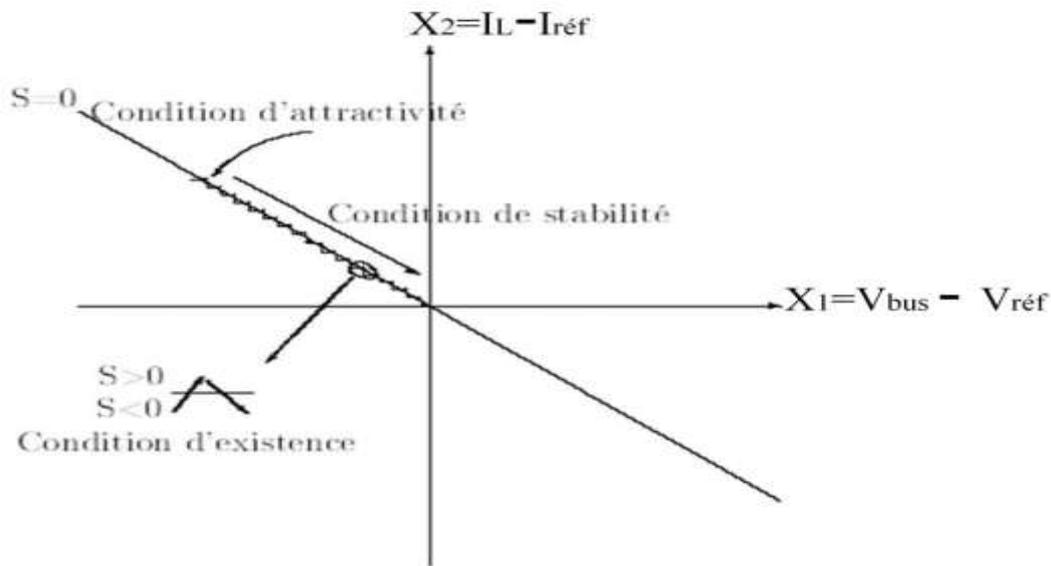


Figure 3.15: Surface de mode glissant

3.2.2.1. Attractivité, Existence et Stabilité :

Les commandes réalisant l'attractivité et l'invariance sont des commandes à structure variable commute entre U^+ et U^- (switching control) suivant le signe de la surface (S). Donc Il faut concevoir une loi de commande discontinue permettant de rendre la surface attractive en tout point de l'espace d'état.

- Une condition suffisante pour que le système soit attractive est la suivante :

$$U = \begin{cases} U^+ & \text{ramené le système à } S > 0 \\ U^- & \text{ramené le système à } S < 0 \end{cases}$$

- La surface S doit être de degré relatif $r = 1$ car la condition d'attractivité doit être réalisée en utilisant le signal de commande (U) ceci n'est possible que si la commande U apparait dans \dot{S} .
- la condition d'existence est : $S \cdot \dot{S} < 0$.
- La condition d'invariance (stabilité) $S = \dot{S} = 0$.

3.2.2.2.Synthèse de la commande par mode glissant

On veut que la tension de bus continue reste constant $V_{dc} = 800V$. Et pour cela on faire l’asservissement en utilisant le dispositif de stockage .donc par cette commande on donne le rapport cyclique de convertisseur (Buck-Boost) qui fonctionne en deux(02) modes :

-la batterie en charge (mode Buck) si la tension $V_{dc} > 800V$.

-la batterie en décharge (mode Boost) si la tension $V_{dc} < 800V$.

On considère le modèle moyen de convertisseur (Buck-boost) décrit par le système d’équations suivant :

$$\begin{cases} V_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} = -(1 - \alpha) V_{dc}(t) + V_b. \\ iC_{dc}(t) = C_{dc} \frac{dV_{dc}(t)}{dt} = (1 - \alpha) i_{lbat}(t) - i_s(t) \end{cases} \quad (3.2).$$

On pose : $U = (1 - \alpha)$, $X_1 = i_{lbat}$, $X_2 = V_{dc}$.

Et le système sous d’équations d’états est :

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = -\frac{U}{L} \cdot X_2 + \frac{V_b}{L} \\ \dot{X}_2 = \frac{U}{C} \cdot X_1 - \frac{i_s}{C} \end{cases} \quad (3.3)$$

Avec : $V_b = \text{constant}$, $i_s(t)$: perturbation.

3.2.2.3. Choix de la surface de glissement :

Le choix concernant la forme de cette surface est en fonction de l’application et l’objectif visé. On trouve dans la littérature que Slotine a proposé une forme générale qui consiste à définir une fonction scalaire dans le plan des phases donnée par :

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{r-1} e(x).$$

x : La variable à commander.

$e(x) = x - xd$: L’erreur de poursuite.

λ : Une constante positive qui interprétera la dynamique de la surface.

r : Le degré relatif du système.

3.2.2.3. Résultats de la simulation :

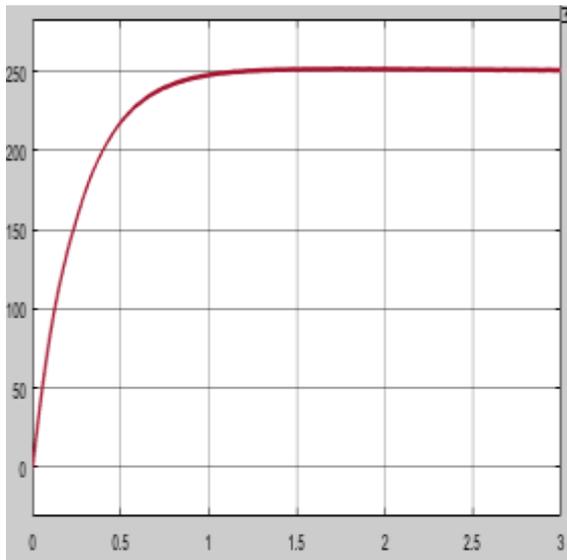


Figure 3.16: Le courant de la batterie (A)

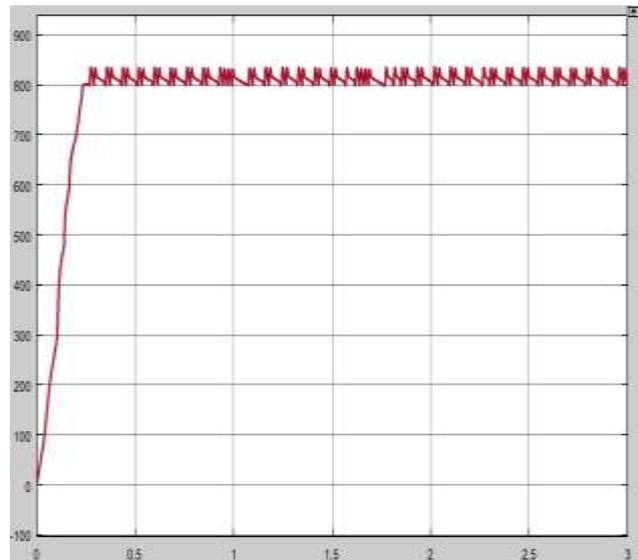


Figure 3.17: La tension du bus continu (en V)

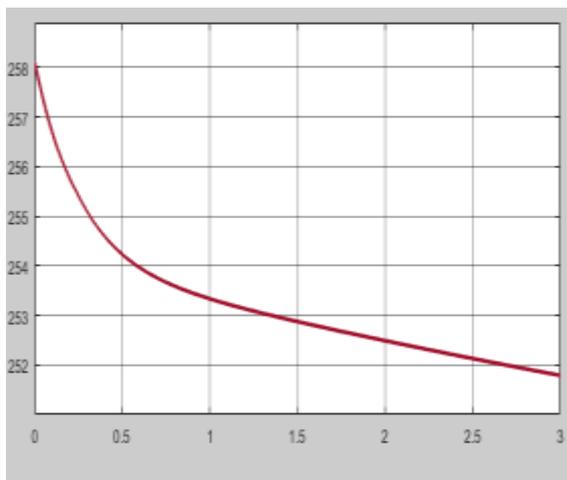


Figure 3.18: La tension de la batterie (V)

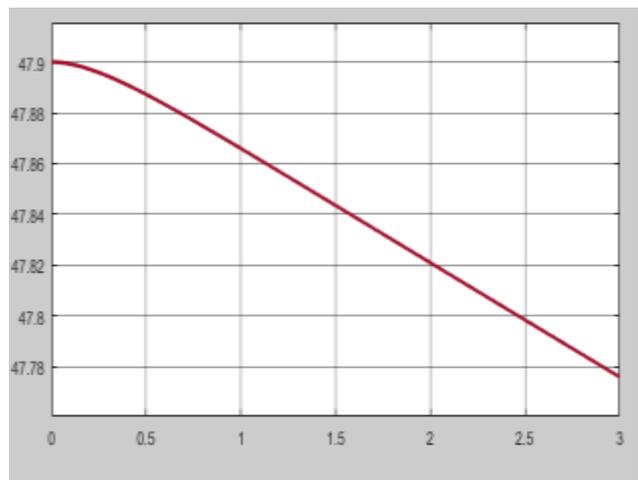


Figure 3.19: L'état de charge de la batterie (en %)

3.2.2.4. Interprétations des résultats:

La tension du bus continu stabilise à 800 volts sans dépassement (reste à 800 volts dès qu'elle l'atteint et ce n'est pas le cas pour le régulateur PI), et c'est un avantage de la commande par mode de glissement. Mais cette commande fait un très grand appel de courant et un décharge plus rapide de la batterie, autrement dit elle utilise le maximum de puissance (switching control), ce qui peut causer en pratique la détérioration de l'un des organes de la chaine (par exemple l'IGBT, la diode, l'augmentation de la température des composants et des circuits... etc.).

3.3. Commande de l'onduleur de tension triphasé

Deux techniques de commande sont largement utilisées pour contrôler les onduleurs triphasés

- Commande par MLI-sinusoidale.
- Commande par MLI vectorielle (SVM).

3.3.1. Commande par MLI-sinusoïdale.

3.3.1.1.Principe de la commande par la MLI sinusoïdale de l'onduleur triphasé :

La commande MLI sinusoïdale est une commande de modulation par porteuse. Son principe consiste à commuter entre les états de l'onduleur de manière à ce que la valeur moyenne de la tension commutée égale la tension de référence. Comme le niveau de la tension du bras est constant, la modulation est obtenue par la variation de la largeur de l'impulsion (ou de son rapport cyclique) [11].

Elle est peut-être la technique la plus utilisée dans le domaine des convertisseurs industriels à cause de :

- la simplicité de son implémentation.
- la bonne qualité de l'énergie fournie.

Cette technique MLI est caractérisée par les paramètres suivants :

- L'indice de modulation m égal au rapport de la fréquence de la porteuse (f_p) à celle de la référence (f_{ref}) : $m = \frac{f_p}{f_{ref}}$.
- Le coefficient de réglage r , égal au rapport de l'amplitude de la référence (V_{ref}) à celle de la porteuse (V_p) : $r = \frac{V_{ref}}{V_p}$.

3.3.1.2.Commande par la MLI sinusoïdale de l'onduleur triphasé :

Pour obtenir la MLI sinusoïdale il faut disposer des tensions de référence des trois bras de l'onduleur. La comparaison de chacune des trois références V_{ref1} , V_{ref2} et V_{ref3} à la porteuse triangulaire $V_p(t)$ donne les signaux de commande S_1 , S_2 et S_3 des composants Tr_1 , Tr_2 et Tr_3 :

$$\begin{cases} S_1 = 1 \text{ Si } V_{ref1}(t) > V_p(t) \text{ sinon } S_1 = 0. \\ S_2 = 1 \text{ Si } V_{ref2}(t) > V_p(t) \text{ sinon } S_2 = 0. \\ S_3 = 1 \text{ Si } V_{ref3}(t) > V_p(t) \text{ sinon } S_3 = 0. \end{cases}$$

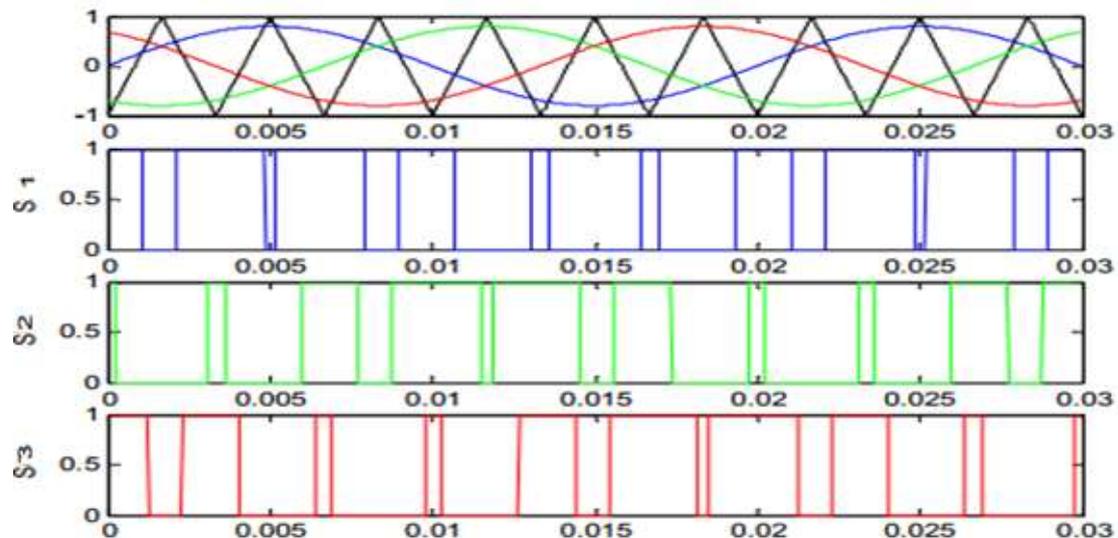


Figure 3.20 : Les signaux de commande de la MLI sinusoïdale triphasé.

Les tensions de sortie triphasée sont obtenus à partir de :

$$\begin{cases} V_{1n} = \left(+\frac{2}{3} S_1 - \frac{1}{3} S_2 - \frac{1}{3} S_3 \right) U_{dc} \\ V_{2n} = \left(-\frac{1}{3} S_1 + \frac{2}{3} S_2 - \frac{1}{3} S_3 \right) U_{dc} \\ V_{3n} = \left(-\frac{1}{3} S_1 - \frac{1}{3} S_2 + \frac{2}{3} S_3 \right) U_{dc} \end{cases} \quad (3.4)$$

3.3.1.3. Résultats de la simulation :

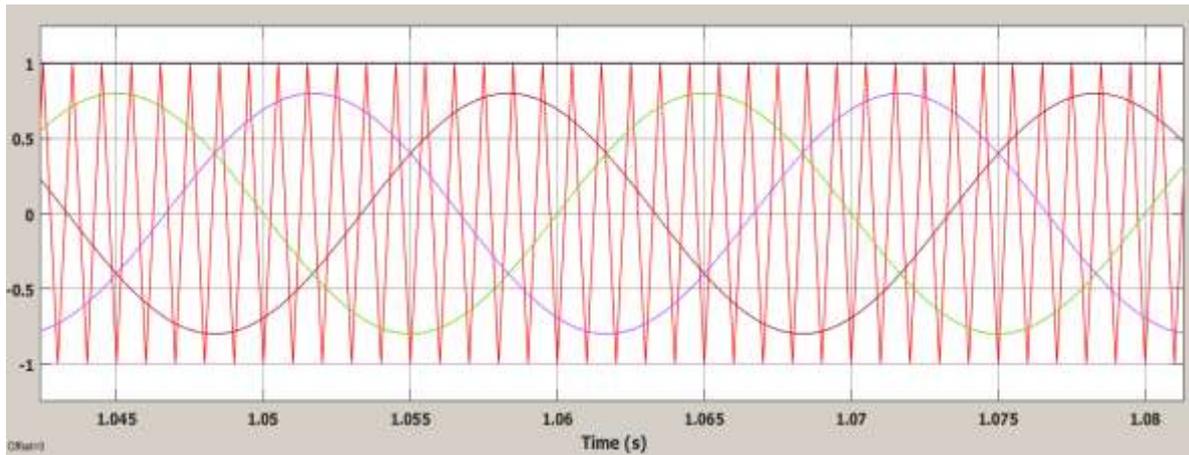


Figure 3.21 : Les tensions (en V) de références et la porteuse (r=0.8).

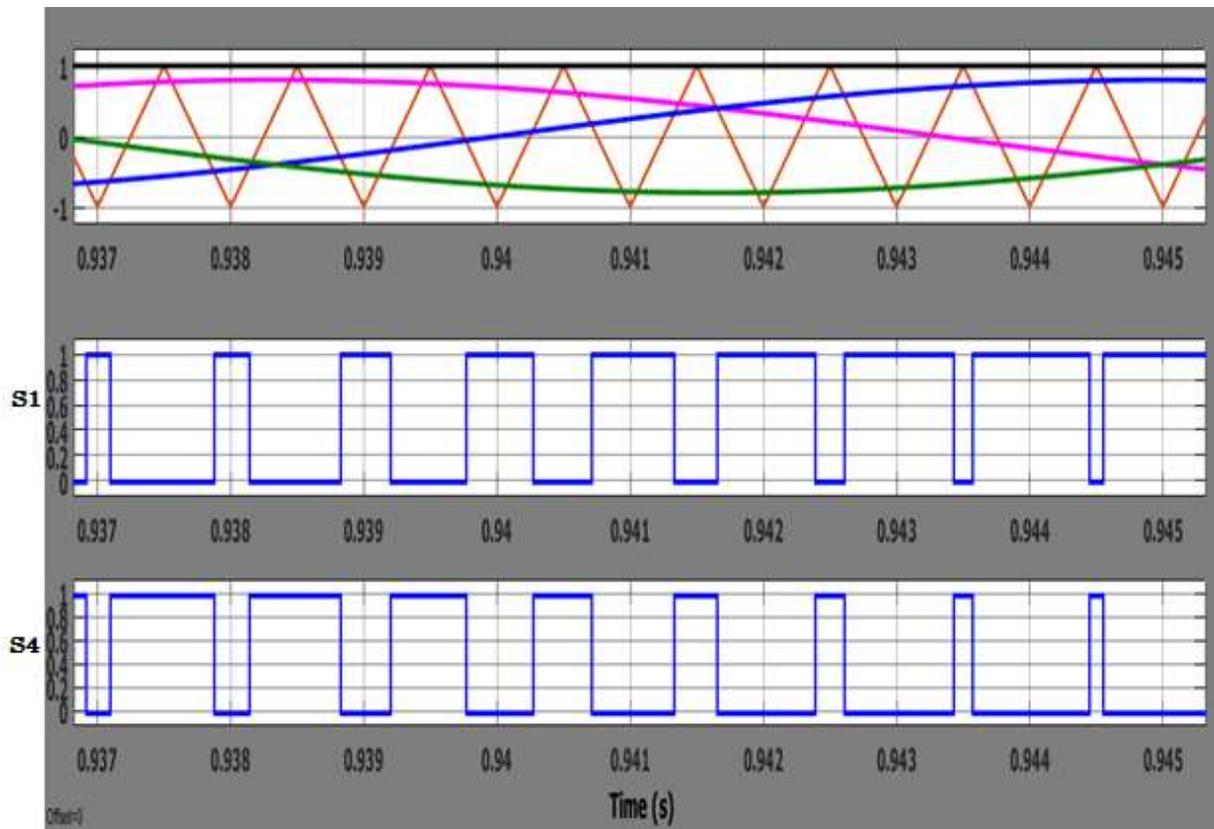


Figure 3.22 : La MLI sinusoidale –la commande S1et son complémentaire S4.

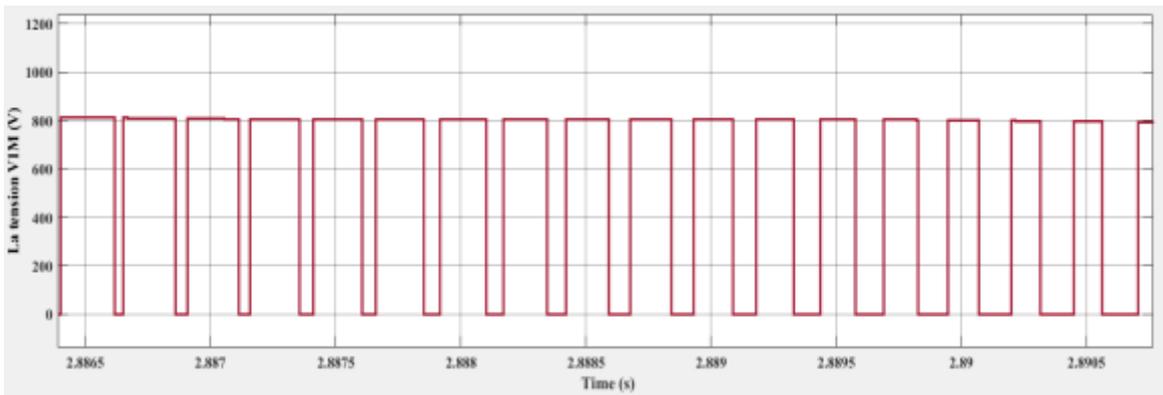


Figure 3.23 : La tension (en V) de sortie du bras (01) V_{1M} .

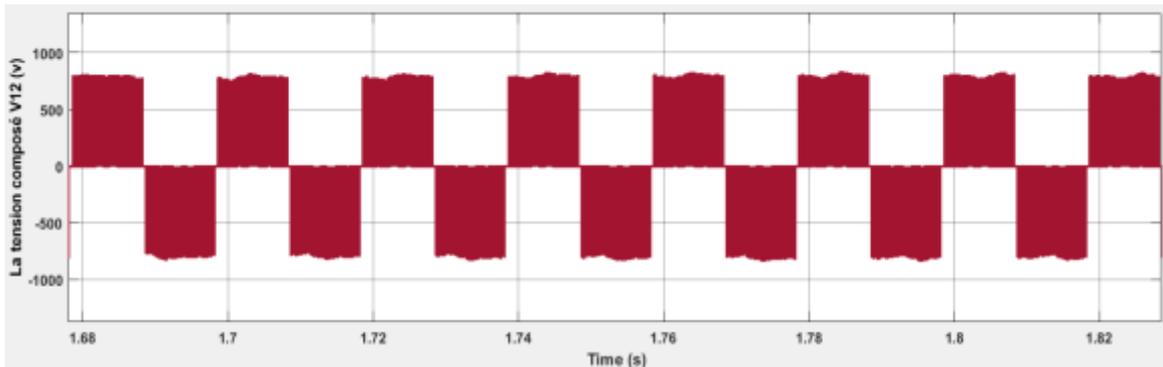


Figure 3.24 : La tension (en V) composé U_{12} .

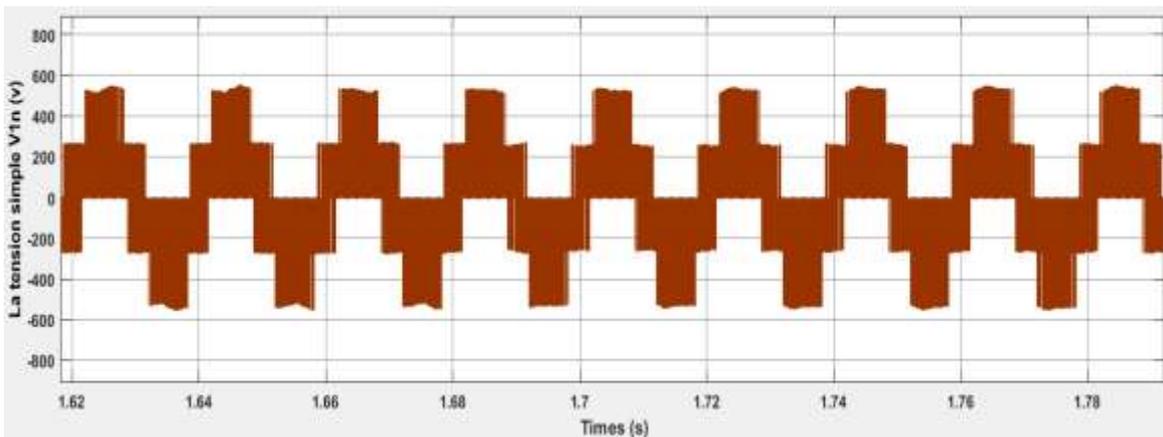


Figure 3.25 : La tension (en V) simple V_{1N} .

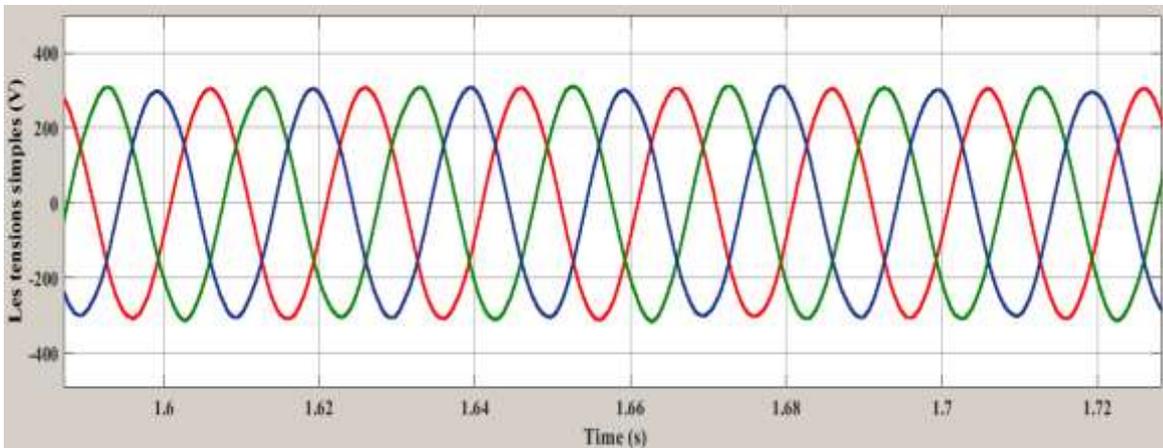


Figure 3.26: Les tensions (en V) simples V_{1N} , V_{2N} et V_{3N} après filtrage.

3.3.2. La MLI sinusoïdale avec l'injection de la troisième harmonique :

3.3.2.1. Courbe de réglage :

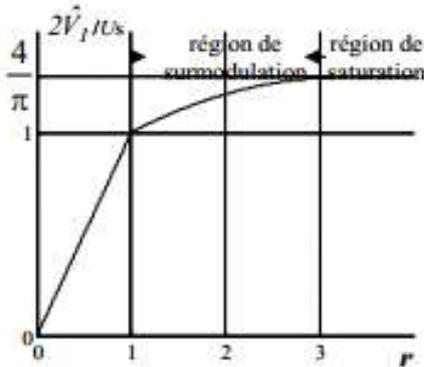


Figure 3.27: Variation de \widehat{V}_1 en fonction de r.

On remarque que le fondamental de V_{In} en valeur relative à $\frac{V_{dc}}{2}$ augmente linéairement avec l'augmentation de r. On constate une saturation lorsque $r=1.15$.

Si $V_{ref} > V_p$ (région de sur-modulation) certaines intersections entre la porteuse et la référence sont perdues ce qui conduit à une tension de sortie ayant un fondamental élevé $>Us/2$.

L'avantage de la sur-modulation ($r>1$) se manifeste dans la capacité de l'onduleur à produire une tension d'amplitude élevée pour la même tension Us ce qui permet à la charge de fonctionner à une tension et une puissance plus élevées pour le même dimensionnement de l'onduleur.

Donc on injecte la 3^{ème} harmonique Pour préserver la linéarité de la modulation même en régime de sur-modulation.

3.3.2.2. Injection du 3^{ème} harmonique.

Pour $r = 1.15$ la tension de référence est en sur-modulation. Donc on ajoute le 3^{ème} harmonique pour former une nouvelle référence incluse dans l'intervalle de modulation ($V'_{ref} = V_{ref} + V_{h3}$).

La technique de sur-modulation permet d'assurer une modulation linéaire jusqu'à la valeur limite du coefficient de réglage ($r = 1.15$) et l'amplitude du 3^{ème} harmonique doit être imposée telle que $\widehat{V}_3 = \frac{V_{ref}}{6}$.

Car :

$$V_{ref} = \widehat{V}_{ref} * \sin(\omega t) + \widehat{V}_3 * \sin(3. \omega t) \quad (3.5)$$

Pour obtenir le maximum on dérive V_{ref} soit :

$$\frac{dV_{ref}}{dt} = \widehat{V}_{ref} * \cos(\omega t) + 3. \widehat{V}_3 * \cos(3. \omega t) \quad (3.6)$$

Le 3^{ème} harmonique passe par zéro à l'instant $\omega t = \frac{\pi}{3}$, donc le maximum est atteint à l'instant $\omega t = \pi/3$. On obtient : $\frac{\widehat{V}_{ref}}{2} - 3. \widehat{V}_3 = 0 \rightarrow \widehat{V}_3 = \frac{V_{ref}}{6}$.

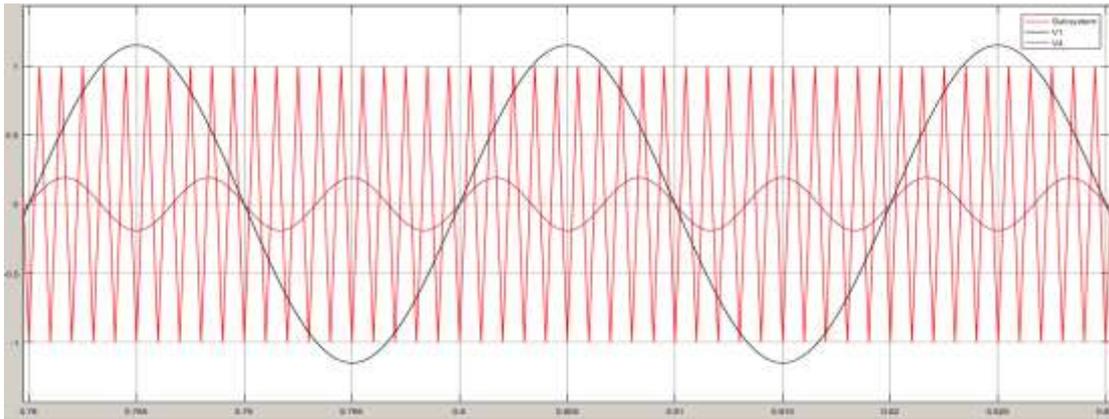


Figure 3.28 : La tension (en V) de référence (1) avec la porteuse et le 3^{ème} harmonique.

3.3.2.3. Résultats de simulation :

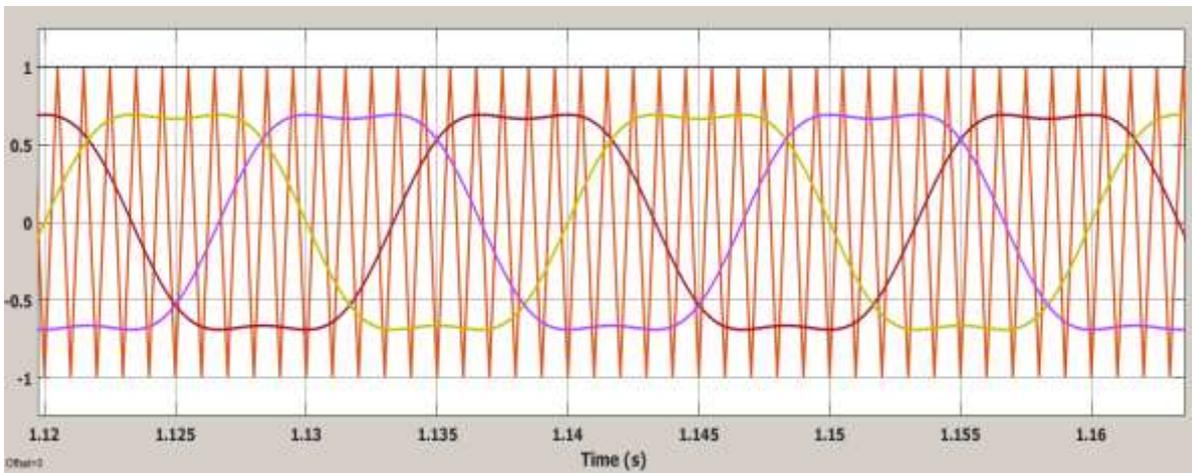


Figure 3.29: Les tensions (en V) de références avec la porteuse ($r = 0.8$).

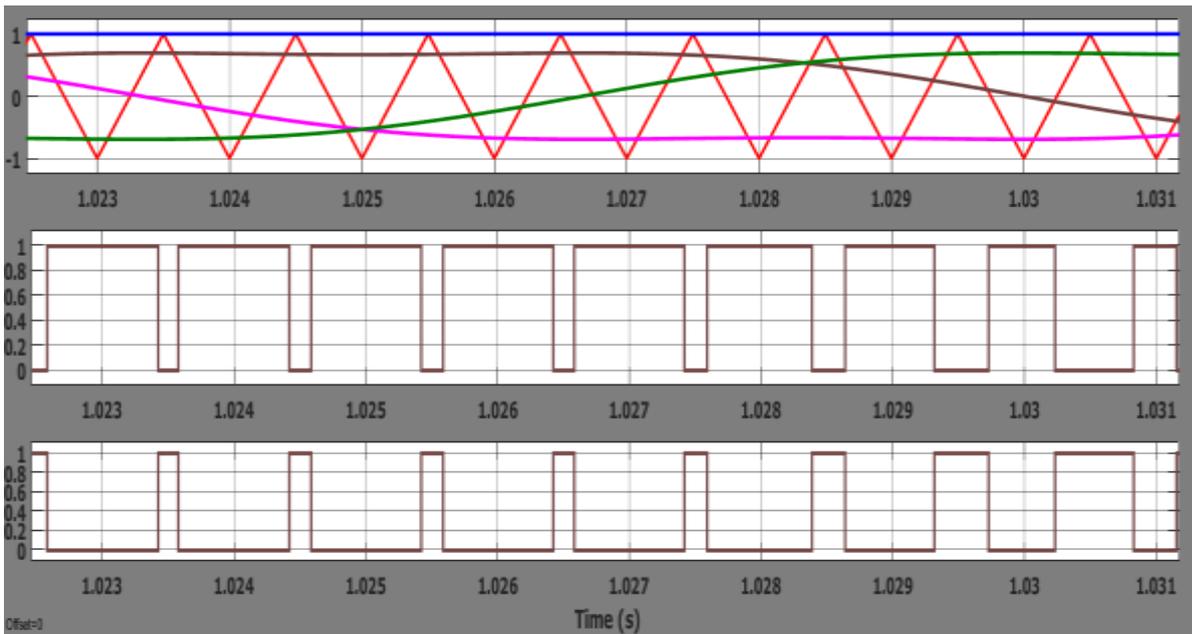


Figure 3.30: La MLI sinusoidale avec injection du 3^{ème} harmonique –la commande S1et son complémentaire.

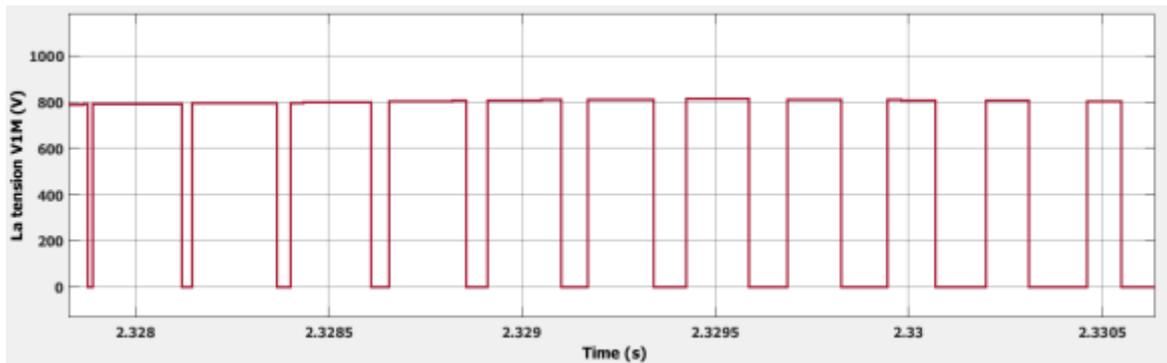


Figure 3.31 : La tension (en V) de sortie du (01) bras

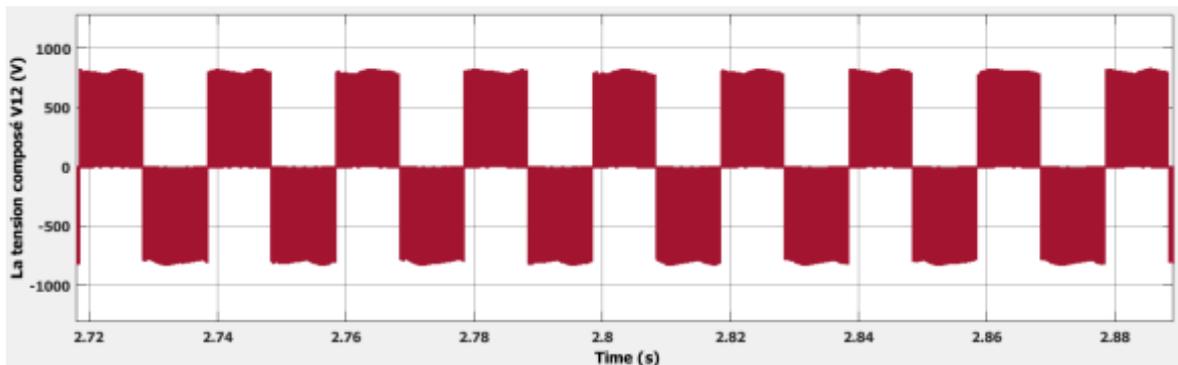


Figure 3.32 : La tension (en V) composé U_{12} .

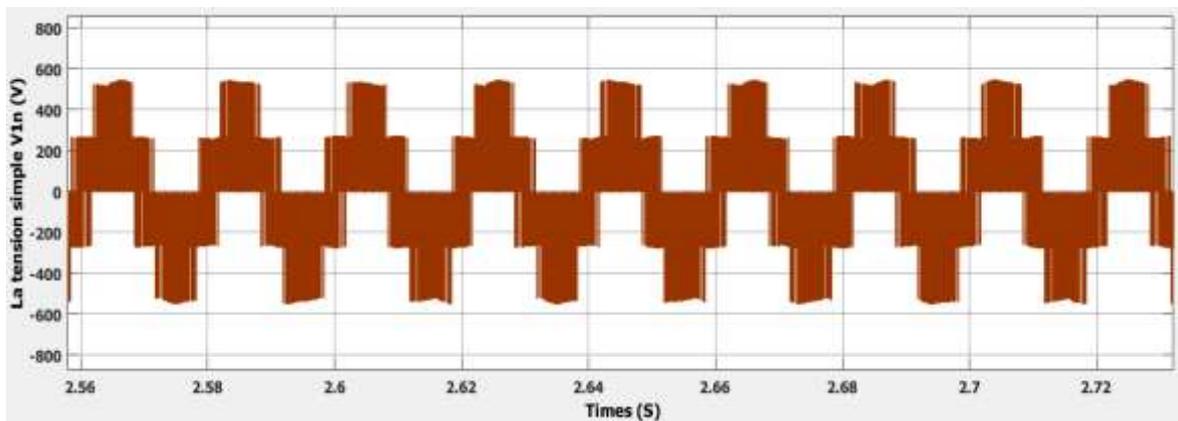


Figure 3.33: La tension (en V) simple V_{1N} .

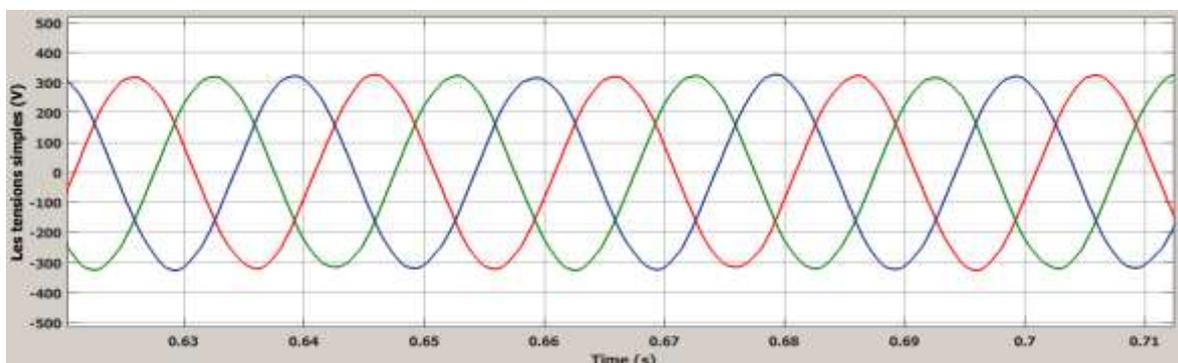


Figure 3.34 : Les tensions (en V) simples V_{1N} , V_{2N} et V_{3N} après

Interprétations des résultats :

La figure (3.21), (3.28) et (3.29) montre les tensions de références et la porteuse.

La figure (3.23) et (3.31) montre la tension V_{1M} entre le bras '1' et le neutre de la source d'alimentation 'M'. On remarque que cette tension prend deux valeurs : 0 V ou 800 V (V_{dc}), d'où son appellation : "Onduleur à deux niveaux".

La figure (3.24) et (3.32) montre la tension V_{12} entre le bras '1' et le bras '2'. On remarque que cette tension prend deux valeurs différentes : 800 V ($+V_{dc}$) ou -800 V ($-V_{dc}$).

La figure (3.25) et (3.33) montre la tension V_{1n} entre le bras '1' et le neutre de la charge 'N'. On remarque que cette tension prend cinq valeurs différentes : $534\text{ V } (\frac{2V_{dc}}{3})$, $267\text{ V } (\frac{V_{dc}}{3})$, 0 V, $-267\text{ V } (-\frac{V_{dc}}{3})$, $-534\text{ V } (-\frac{2V_{dc}}{3})$.

La figure (3.26) et (3.34) montre les tensions simples des trois bras V_{1n} , V_{2n} et V_{3n} . On remarque que ces trois tensions approximent la forme de trois tensions sinusoïdale, de fréquence 50 Hz et déphasées entre elles de $\frac{2\pi}{3}$ l'une à l'autre.

D'après les figures (3.26) et (3.34) de simulation, nous remarquons que les tensions à la sortie sont bien filtrée .et ceci est la conséquence du bon choix des paramètres du filtre LC.

En conclusion, les deux techniques sont valables et donnent des bons résultats, mais la MLI avec injection de la 3^{ième} harmonique on peut travailler avec un taux de réglage dans la région de sur-modulation jusqu'à 1.15.

3.3.3. La commande par MLI vectorielle (SVM) :

La modulation vectorielle est une modulation en temps réel. Elle utilise le fait qu'un vecteur peut représenter les trois tensions d'un système triphasé de somme nulle. Comme il est vu dans le chapitre précédent, l'onduleur triphasé de tension génère huit états qui incluent six états actifs et deux états nuls. Dans un plan avec l'axe α en abscisse et l'axe β en ordonnée, on obtient l'hexagone de la figure. Celui-ci peut être divisé en six secteurs, chaque secteur étant formé d'un triangle dont les sommets sont l'état 0 ou 7, et deux états consécutifs : états (1-2), (2-3)... (5-6), (6-1). Ils sont délimités par des vecteurs comme le montre la figure (3.35) [12] [13].

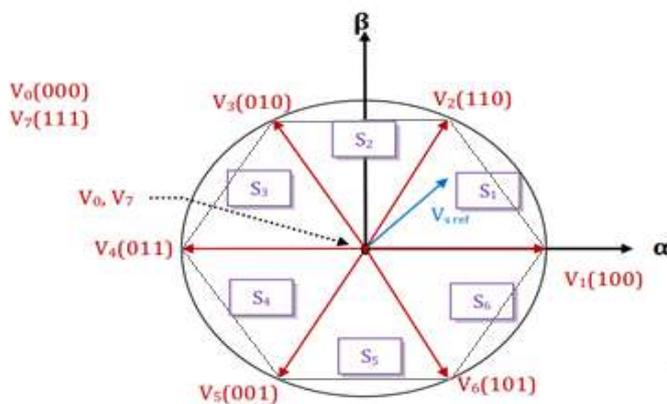


Figure 3.35: Représentation des 8 états de l'onduleur dans le repère (α, β) , et les différents secteurs.

Cette technique numérique est effectuée à chaque période d'échantillonnage en sélectionnant les états appropriés des interrupteurs et en déterminant la durée d'application de chacun des états. La sélection des états et la détermination des durées sont basées sur la transformation triphasée (abc)-biphasée (α, β).

3.3.3.1. Transformation triphasée biphasée

Les grandeurs triphasées, dont la somme des composantes est nulle dans le référentiel fixe (abc), peuvent être représentées par une grandeur biphasée dans un repère fixe (α, β), en utilisant la transformation qui maintient le module invariant [21] :

$$\begin{cases} V_\alpha = \frac{2}{3} (V_a - \frac{1}{2} (V_b - V_c)) \\ V_\beta = \frac{\sqrt{3}}{3} (V_b - V_c). \end{cases} \quad (3.7)$$

Cette transformation peut être mise sous une forme compacte en utilisant l'opérateur :

$$\begin{cases} V_\alpha = \frac{2}{3} (V_a - \frac{1}{2} (V_b - V_c)) \\ V_{ref} = \frac{2}{3} (V_a + aV_b + a^2V_c) \end{cases} \quad (3.8)$$

Si les références forment un système sinusoïdal triphasé équilibré, caractérisé par l'amplitude V_{ref} et la pulsation w , au vecteur de tension de référence $V_{abc} = [V_a, V_b, V_c]$ dans le référentiel fixe (abc), correspond le vecteur V_{ref} dans le repère fixe (α, β), d'amplitude constante et tournant à la vitesse angulaire w . Cette transformation peut être appliquée aux huit états de l'onduleur à deux niveaux, ce qui conduit à huit vecteurs V_0 à V_7 dans le repère (α, β).

V_i	Ordre de commande			Tensions de phase (Triphasé)			Tensions biphasée		V	Θ
	S_1	S_2	S_3	V_{1n}	V_{2n}	V_{3n}	V_α	V_β		
V0	0	0	0	0	0	0	0	0	2/3	-
V1	1	0	0	2/3	-1/3	-1/3	2/3	0	2/3	0
V2	1	1	0	1/3	1/3	-2/3	1/3	0.58	2/3	60
V3	0	1	0	-1/3	2/3	-1/3	-1/3	0.58	2/3	120
V4	0	1	1	-2/3	1/3	1/3	-2/3	0	2/3	180
V5	0	0	1	-1/3	-1/3	2/3	-1/3	-0.58	2/3	240
V6	1	0	1	1/3	-2/3	1/3	1/3	-0.58	2/3	300
V7	1	1	1	0	0	0	0	0	2/3	-

Tableau 3.1 : Vecteurs de l'onduleur à deux niveaux dans le repère (α, β)

3.3.3.2. Algorithme de la SVM d'un onduleur

L'algorithme de la MLI vectorielle pour un onduleur deux niveaux, est structuré sous la forme suivante :

- La représentation vectorielle des tensions triphasées dans un plan bidimensionnel (α, β) .
- La détermination du vecteur de tension V_{ref} dans le repère (α, β) .
- La détermination de l'angle de rotation θ .
- L'isolation des 2 configurations V_i et V_{i+1} qui encadrent V_{ref} dans les secteurs.
- L'exploitation des relations qui donnent T_i et T_{i+1} et T_0 .
- On place les vecteurs V_i et V_{i+1} et V_7 sur une période de découpage T_z suivant la séquence satisfaisant la minimisation du nombre de commutations par période du fondamental de la tension désirée [21].

3.3.3.3. Les temps d'application des états de l'onduleur :

La partie centrale de la stratégie SVM est la détermination des temps qui doivent être attribués à chaque vecteur de tension durant chaque cycle de modulation ou période d'échantillonnage (T_e).

À chaque période de commutation de l'onduleur le vecteur projeté sur ses deux vecteurs adjacents assure le calcul des temps de commutation.

$$\text{On donne : } \begin{cases} T_i = V_{ref} \cdot \sqrt{3} \cdot T_z \cdot \sin\left(\left(\frac{\pi}{3}\right) - \theta\right). \\ T_{i+1} = V_{ref} \cdot \sqrt{3} \cdot T_z \cdot \sin(\theta). \\ T_0 = T_z - (T_i + T_{i+1}). \end{cases} \quad (3.9)$$

3.3.3.4. Détermination des séries d'impulsions pour chaque bras de l'onduleur :

Afin d'obtenir de performance optimum en harmoniques (moins d'harmoniques en sortie), et une fréquence de commutation minimum pour chaque composant de puissance, l'ordre des états est arrangé tels que la transition d'un état au prochain est exécuté en commutant seulement un bras de l'onduleur [28].

pour les secteurs impairs ($i= 1, 3, 5$), la séquence est la suivante: $V_0 V_i V_{i+1} V_7 V_{i+1} V_i V_0$. Et pour les secteurs pairs ($i= 2, 4, 6$), la séquence est la suivante: $V_0 V_{i+1} V_i V_7 V_i V_{i+1} V_0$.

La figure (3.36) illustre l'analyse qui vient d'être décrit pour chaque secteur.

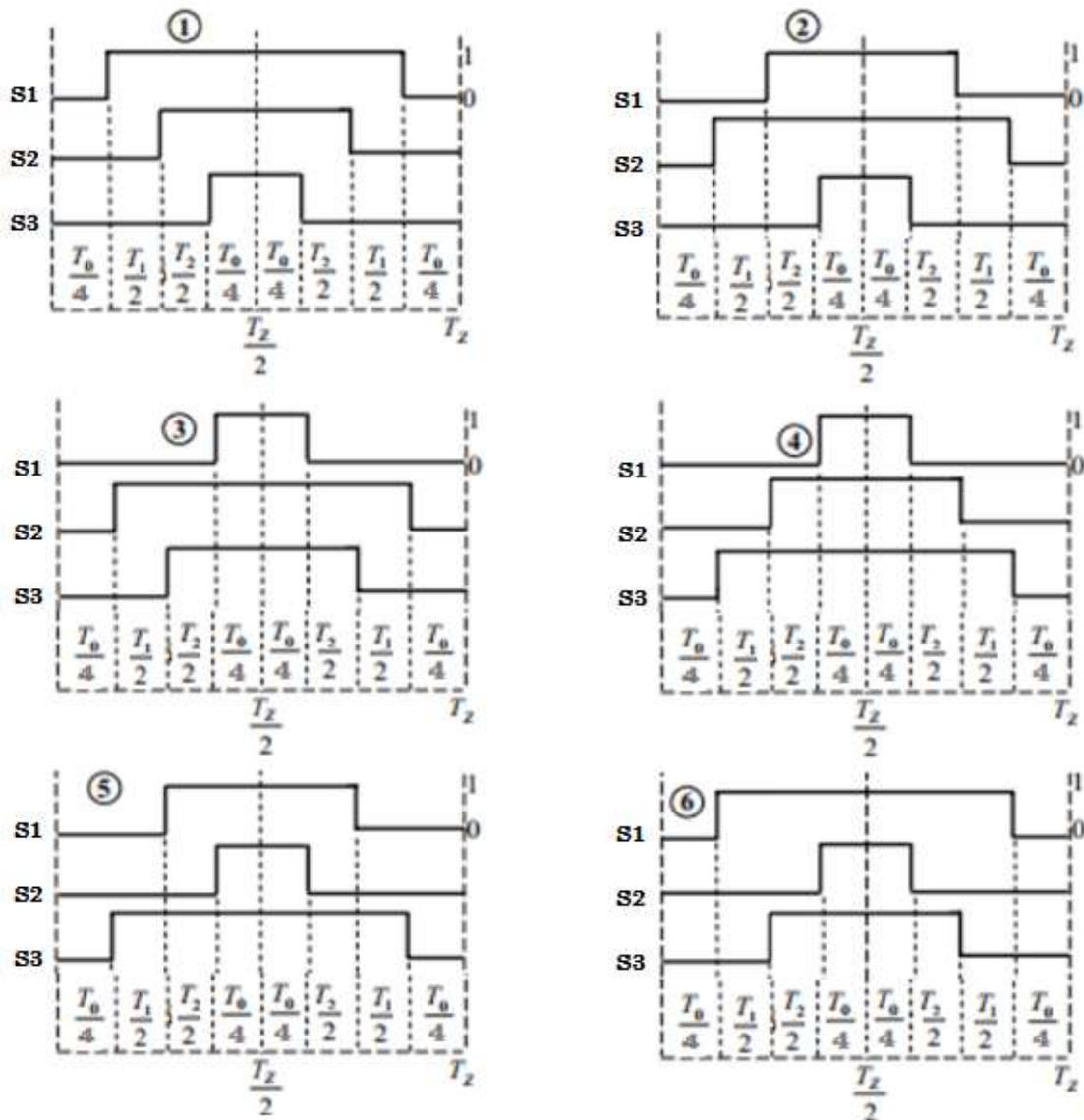


Figure 3.36 : Signaux de commande pour chaque secteur

3.3.3.5. Résultats de la simulation :

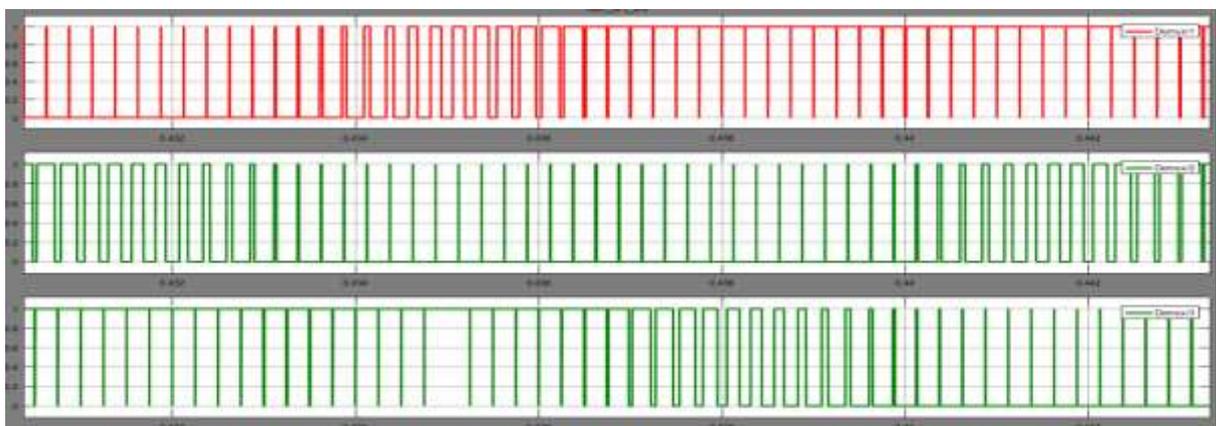


Figure 3.37: Les signaux de commande S1, S2 et S3.



Figure 3.38 : Les secteurs 6 et 1.

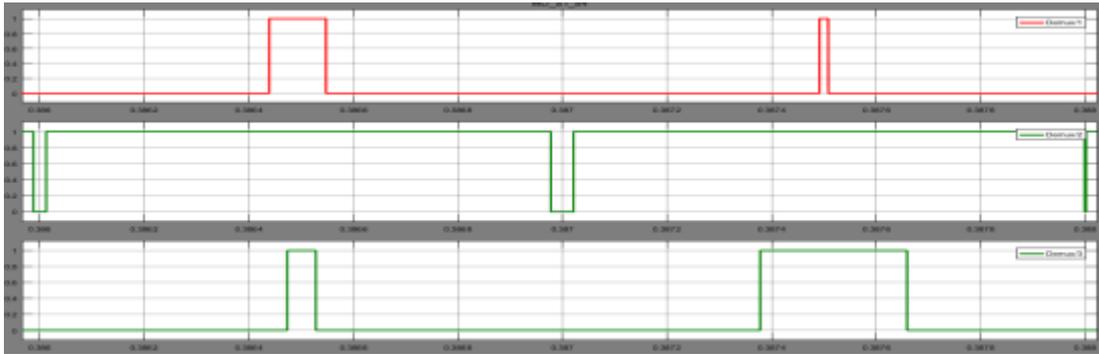


Figure 3.39: Les secteurs 2 et 3.

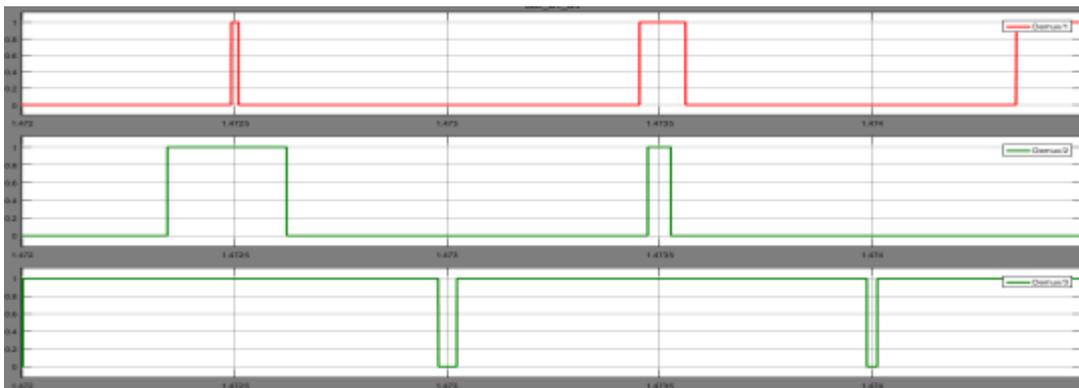


Figure 3.40: Les secteurs 4 et 5.

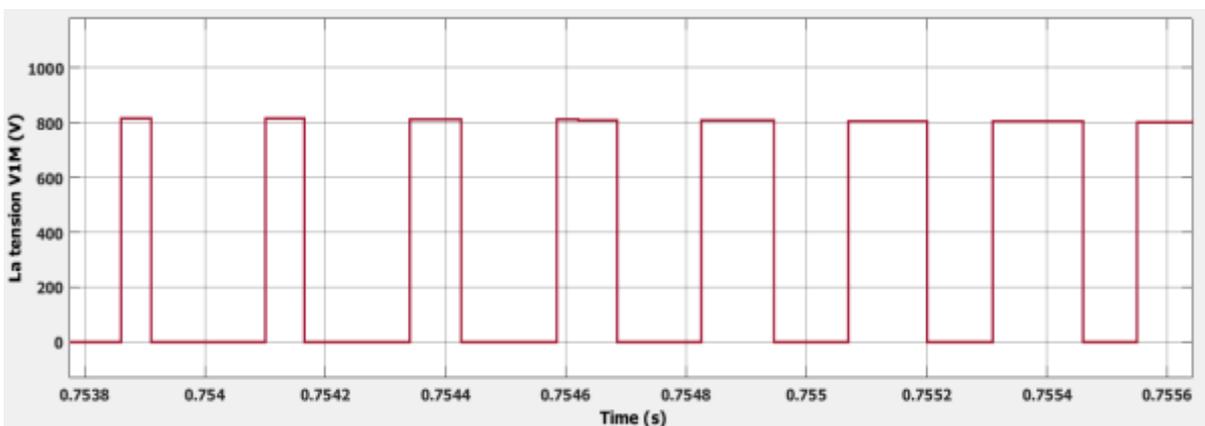


Figure 3.41: Le signal de sortie de (01) bras V1M.

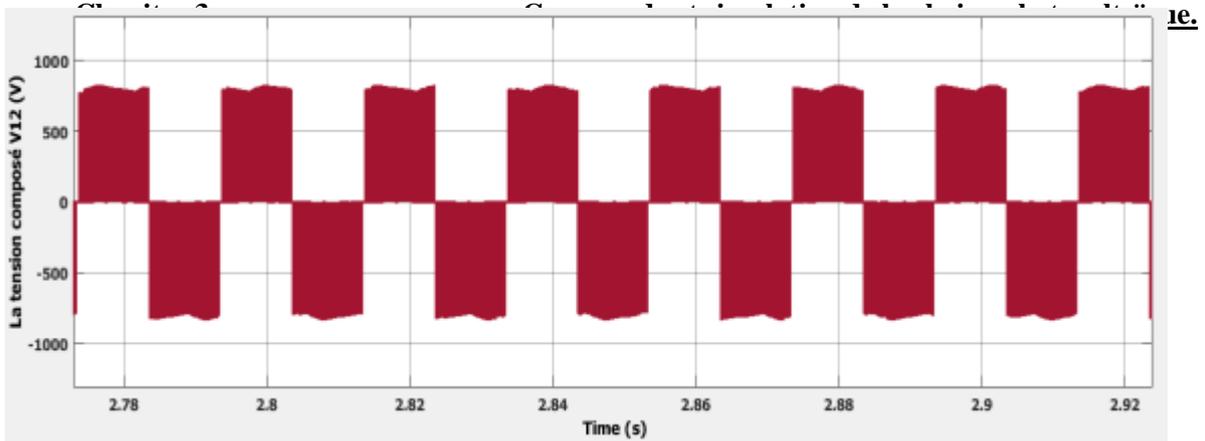


Figure 3.42: La tension composé U_{12} .

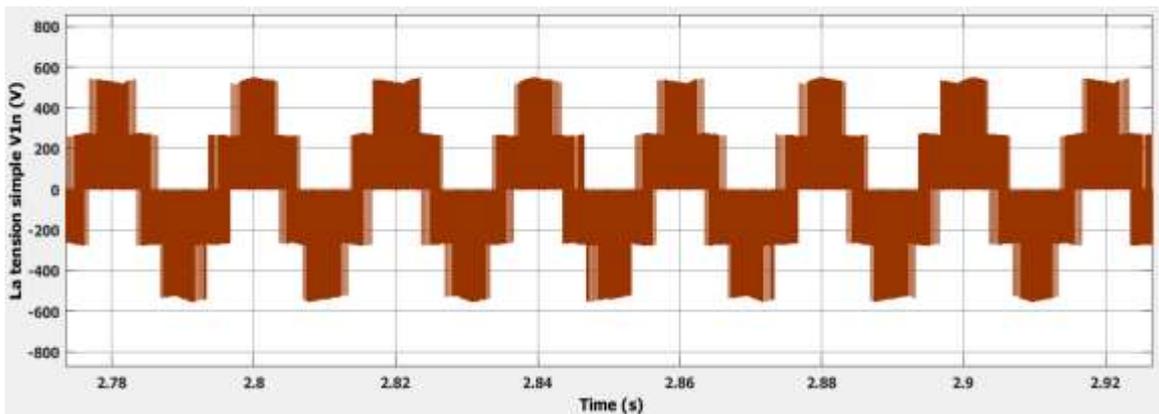


Figure 3.43: La tension simple V_{1N} .

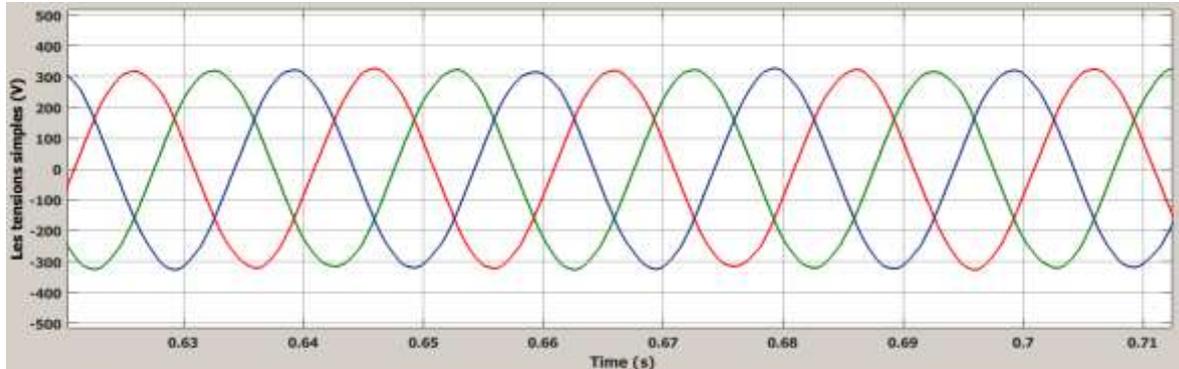


Figure 3.44: Les tensions simples V_{1N} , V_{2N} et V_{3N} après le filtrage.

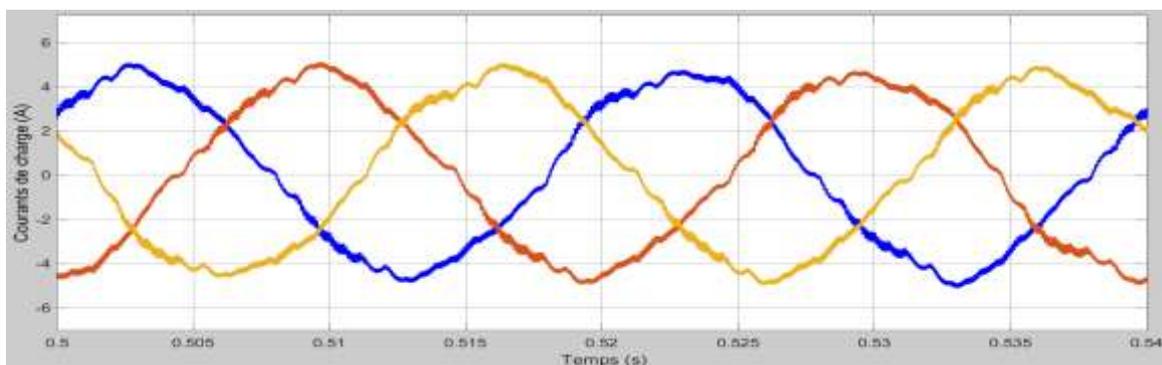
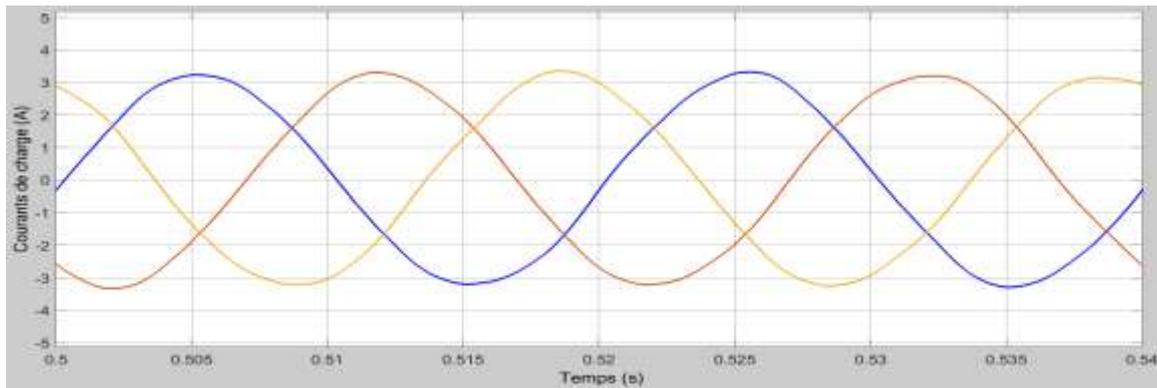


Figure 3.45 : le courant de l'inductance I_{Lf} (avant filtrage)

Figure3.46 : Les courants de charge I_{ch} filtré

Interprétations des résultats :

La figure (3.37) montre les signaux de commande des différents bras (1, 2,3), après on a fait un zoom sur des différents périodes on a trouvé tous les secteurs qu'on a parlé dans la théorie et les figures (3.38) et (3.39) et (3.40) montrent ces résultats.

La figure (3.41) montre la tension V_{1M} entre le bras '1' et le neutre de la source d'alimentation. On remarque que cette tension prend deux valeurs : 0 V ou 800 V (V_{dc}).

La figure (3.42) montre la tension V_{12} entre le bras '1' et le bras '2'. On remarque que cette tension prend deux valeurs différentes : 800 V ($+V_{dc}$) ou -800 V ($-V_{dc}$).

La figure (3.43) montre la tension V_{1n} entre le bras '1' et le neutre de la charge 'N'. On remarque que cette tension prend cinq valeurs différentes : $534 \text{ V} (\frac{2V_{dc}}{3})$, $267 \text{ V} (\frac{V_{dc}}{3})$, 0 V, $-267 \text{ V} (-\frac{V_{dc}}{3})$, $-534 \text{ V} (-\frac{2V_{dc}}{3})$.

La figure (3.44) montre les tensions simples des trois bras V_{1n} , V_{2n} et V_{3n} . On remarque que ces trois tensions approximent la forme de trois tensions sinusoïdale, de fréquence 50 Hz et déphasées entre elles de $\frac{2\pi}{3}$ l'une à l'autre.

D'après la figure (3.44) et (3.46) de simulation, nous remarquons que les tensions et les courants à la sortie sont bien filtrée .et ceci est la conséquence du bon choix des paramètres du filtre LC.

En conclusion la technique SVM donne des bons résultats avec Seulement un vecteur tension de référence commandé pour générer trois ondes sinusoïdales.

3.4.Gestion d'énergie :

Introduction

On a vu précédemment que l'énergie extraite du panneau dépend strictement des conditions météorologiques autrement dit la température et l'ensoleillement, ce qui peut causer une mauvaise conversion d'énergies. L'intérêt de cette partie est l'adaptation de l'énergie dans les différents étages de la chaine PV (l'étage de production, l'étage de stockage, l'étage de consommation) à des états de fonctionnement particulières pendant des conditions météorologique différentes autrement dit réduire le besoin de recourir au réseau électrique et accomplir l'équilibre de puissance entre les sources d'énergie et les charges.

La gestion assure le bon fonctionnement et la protection du dispositif de stockage. Pour cela on doit étudier les différents cas particuliers vu l'état de charge de la batterie et la puissance mis en jeu puis proposer les actions à faire dans chaque étage, afin d'optimiser et assurer la continuité de le fonctionnement de la chaine et d'autre part on garantit une durée de vie maximale du système de stockage. Ce système de gestion est construit en observant :

- L'état de charge de la batterie.
- La puissance fournie par le PV.

De là on obtient les différents modes de fonctionnement suivants :

- Le mode normale, le PV fonctionne en MPPT et la batterie fonctionne avec le PI (mode 1).
- la puissance produite par le PV est satisfaisante aux demandes de la charge et la batterie est entièrement chargée (mode 2).
- la puissance produite par la source et le stockage n'est pas suffisante (mode 3).
- La puissance produite satisfait une charge prioritaire et plus (mode 4).

On construit cet algorithme de gestion afin de superviser l'énergie mis en jeu :

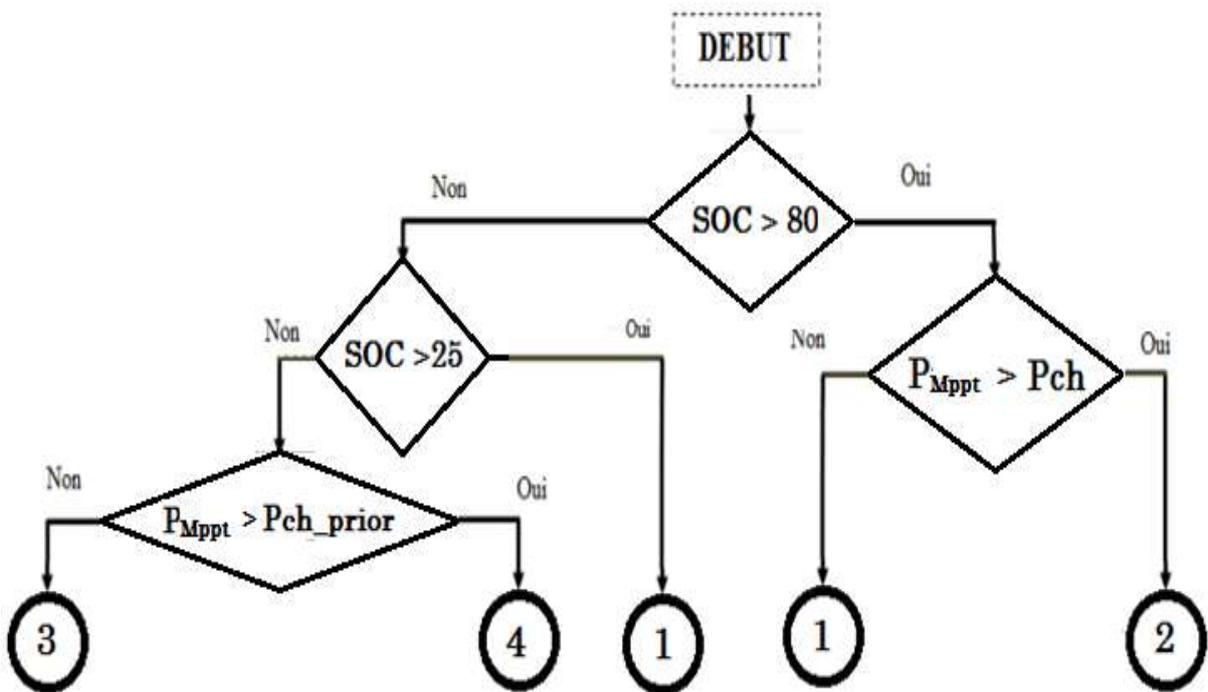


Figure 3.47.1 : algorithme de gestion d'énergie

3.4.1. Gestion d'énergie fournie par le PV :

Par défaut le PV fonctionne en mode MPPT, mais si la puissance fournie par le PV est supérieur à celle demandé et la batterie est entièrement chargée (SOC est supérieur à 90%), donc on a besoin de limitée la puissance généré par le PV, ce mode est appeler mode puissance limitée (PL)

3.4.2. Puissance limitée

A pour principale but la protection de la batterie, et la satisfaction de la charge. Pour basculée à ce mode en doit premièrement déconnecté le dispositif de stockage à l'aide d'un Switch commandé et faire stabiliser la tension du bus continu (stabiliser) à travers un régulateur et un Switch qui passe du mode MPPT au mode PL.

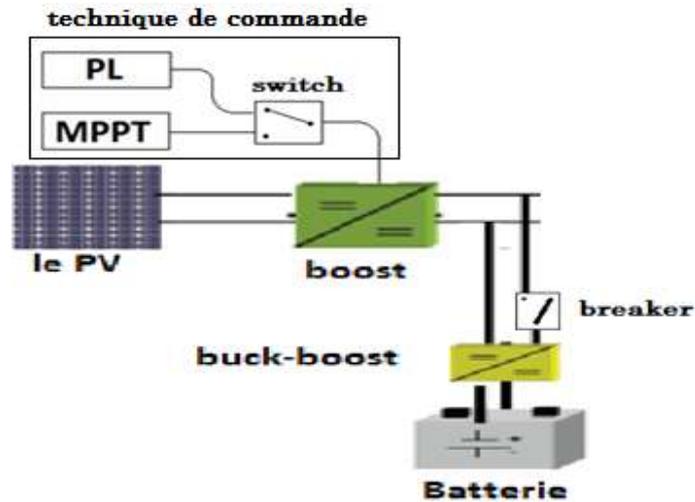


Figure 3.47 : La commande complète du hacheur

Afin de tester le régulateur, et le Switch on fait une petite simulation, en mettant un « signal builder » pour l'irradiation et un autre pour le SOC, où on met deux états :

- 1000w/m² et 90% pour faire fonctionner le mode de puissance limitée.
- 590 w/m² et 70% pour fonctionner le mode MPPT.

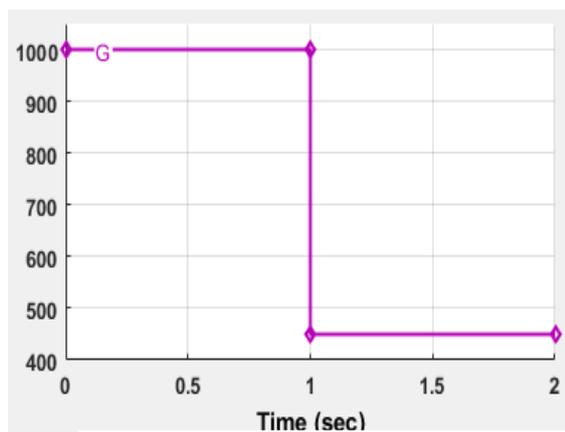


Figure 3.48 : L'irradiation (enW/m²)

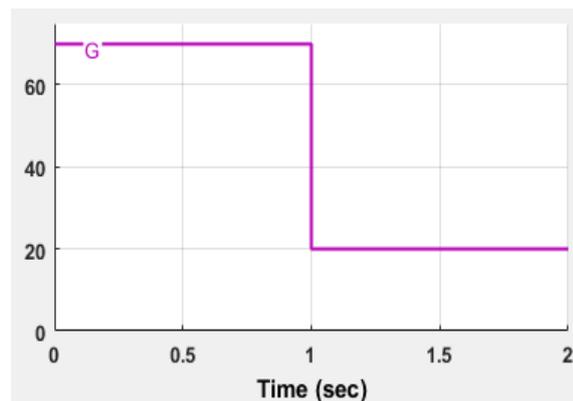


Figure 3.49 : L'état de charge de la batterie (en %)

Le résultat obtenu est :

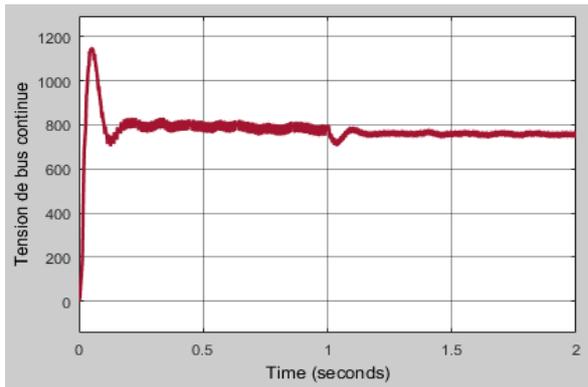


Figure 3.50 : La tension du bus continu (V)

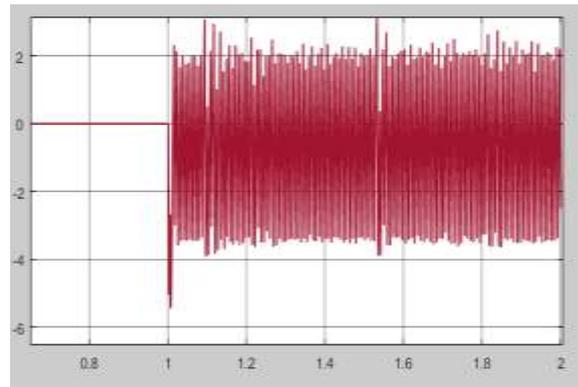


Figure 3.51 : Le courant de la batterie (A).

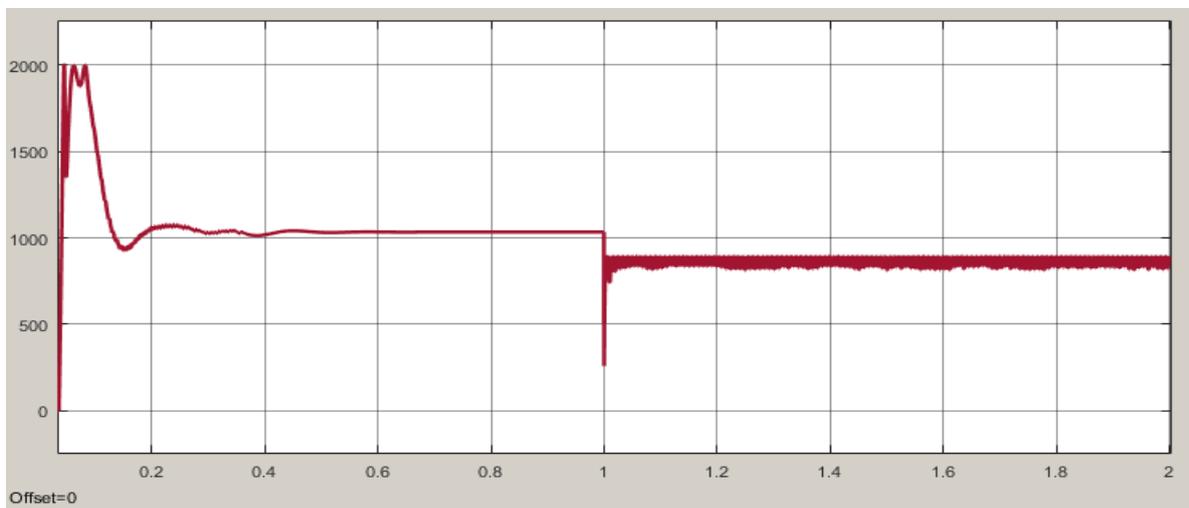


Figure 3.52 : La puissance produite par le PV (en W)

Interprétation des résultats :

De 0 à 1s, la puissance produite est stabilisée à 1kw, et la tension du bus continu est maintenu à 800V parce que le dispositif de stockage est déconnecte (courant de la batterie est nul). De 1 à 2s le Switch bascule au mode MPPT ce qui est indiqué par la charge de la batterie (courant négatif).

3.4.3. Gestion d'énergie des charges :

Si la puissance produite par le PV et celle fournie par la batterie sont insatisfaisantes pour la charge c'est le cas où l'état de charge de la batterie est inférieur à 25%, on doit alimente seulement la charge prioritaire (le panneau PV est dimensionné de tel sorte qu'il puisse satisfaire la charge prioritaire dans le mauvais cas) et on fait le délestage des autres charges. Et on a encore deux cas dans cette partie :

- ✓ la charge propriétaire consomme toute la puissance fournie par le PV
- ✓ La puissance fournie par le PV satisfaite largement la charge propriétaire, donc on doit charger la batterie en parallèle.

On fait une petite simulation pour ce cas, on fixe l'irradiation à une faible valeur, de tel sorte que la charge prioritaire n'est pas satisfaite :

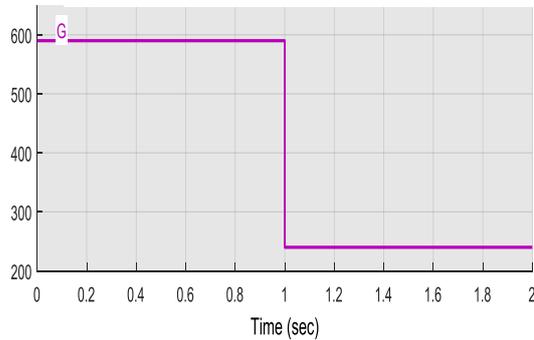


Figure 3.53 : L'irradiation (en W/m²)

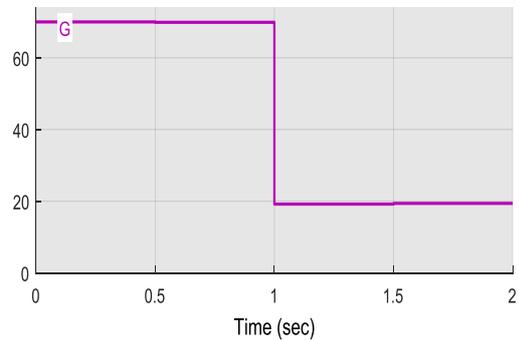


Figure 3.54 : L'état de charge de la batterie (en %)

On obtient comme résultats :

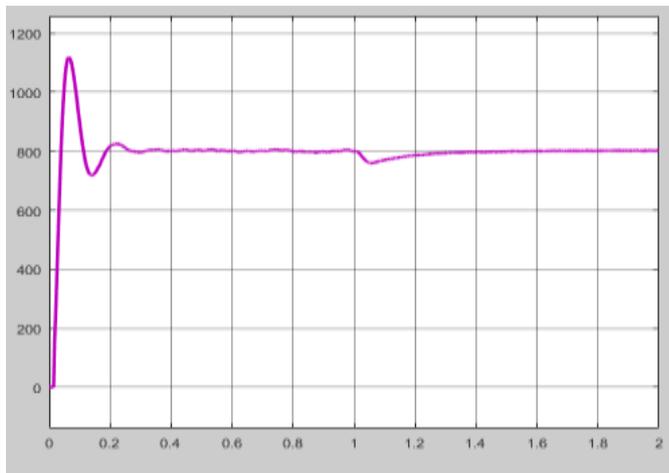


Figure 3.55 : La tension du bus continu (V)

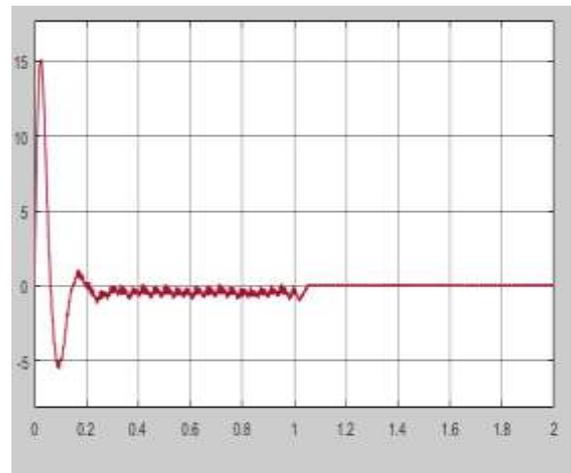


Figure 3.56 : Le courant de la batterie (A).

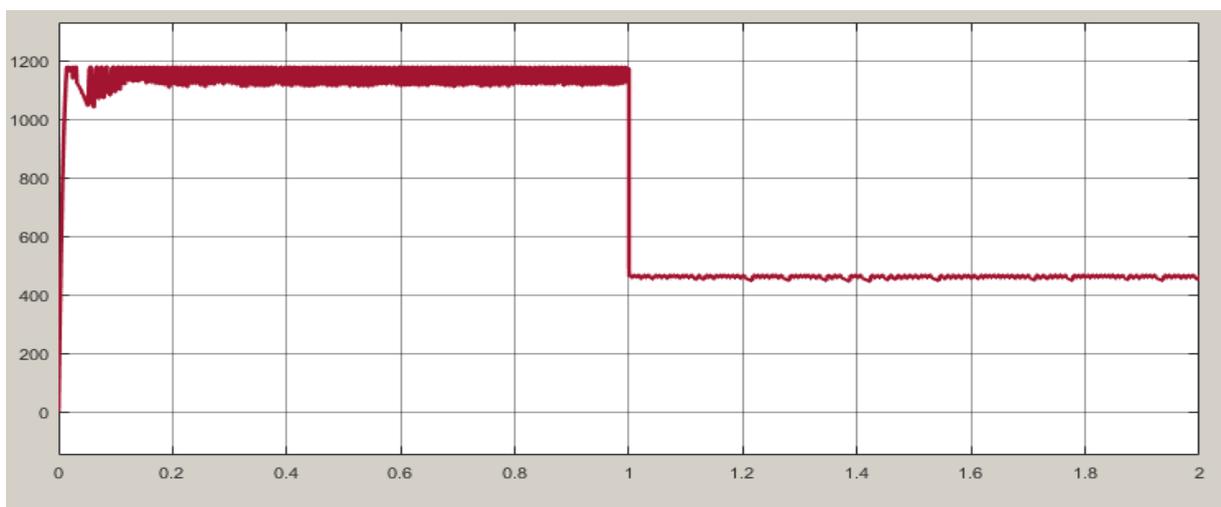


Figure 3.57: La puissance produite par le PV (en W)

Interprétation des résultats :

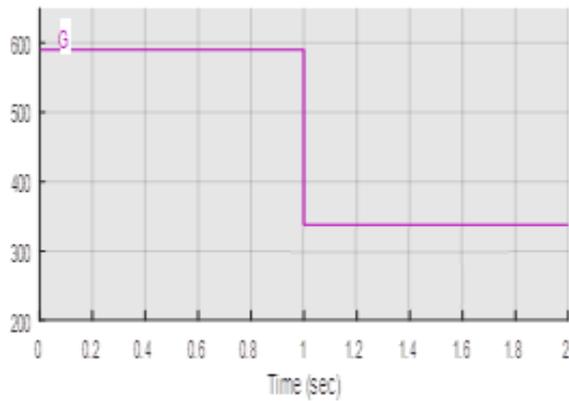


Figure 3.58: L'irradiation (enW/m²)

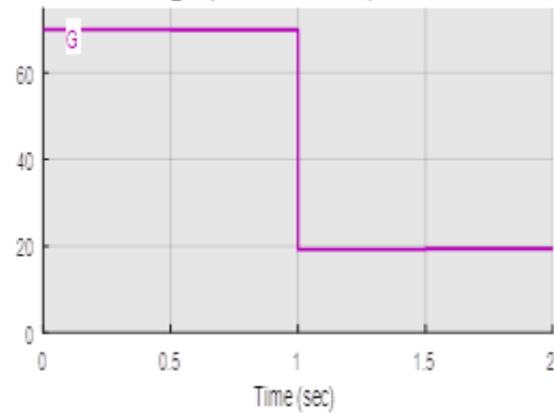


Figure 3.59 : L'état de charge de la batterie (en %)

De 0 à 1s, le système fonctionne en mode normale. De 1 à 2s le breaker déconnecte les charges non prioritaires, et un autre breaker déconnecte la batterie.

On fait une 2^{ème} simulation, où on fixe l'irradiation à une faible valeur, mais cette fois de tel sorte que la charge prioritaire est satisfaite, on obtient comme résultats :

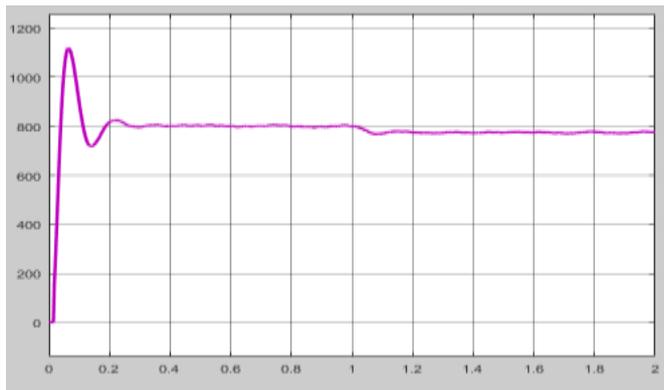


Figure 3.60 : La tension du bus continu (V)

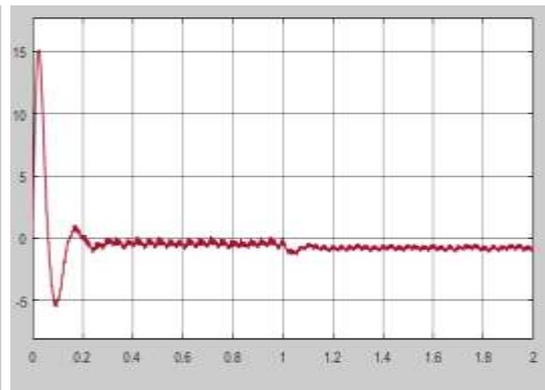


Figure 3.61 : Le courant de la batterie (A).

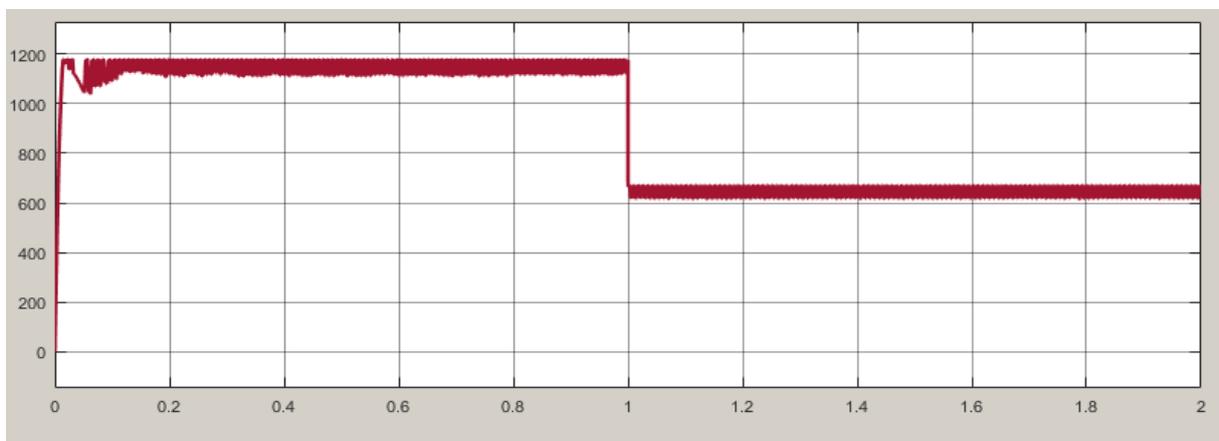


Figure 3.62 : La puissance produite par le PV (en W)

Interprétation des résultats :

De 0 à 1s, le système fonctionne en mode normale. De 1 à 2s le breaker déconnecte les charges non prioritaires, et la batterie se charge ce qui est indiqué par le courant négatif.

3.4.4. Simulation de tous les cas :

On résume et simule les différents modes de fonctionnement considéré par la gestion en utilisant les signaux de l'éclairement et SOC suivants :

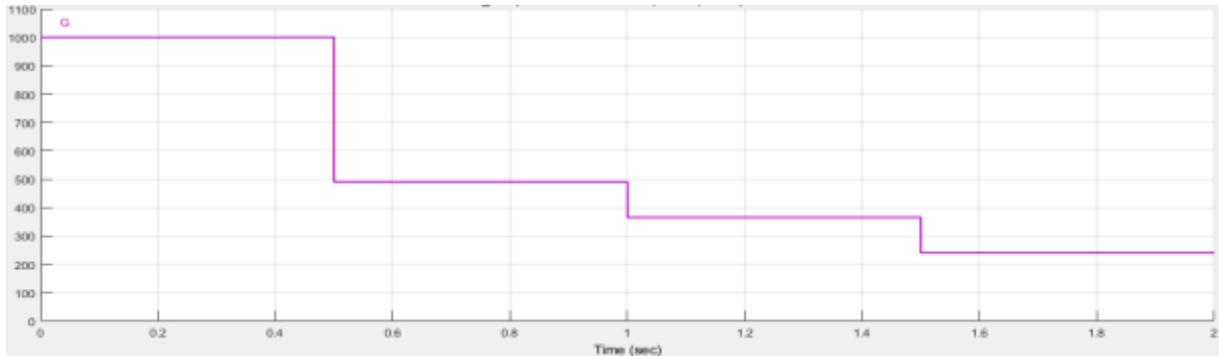


Figure 3.63: L'irradiation (en W/m^2)

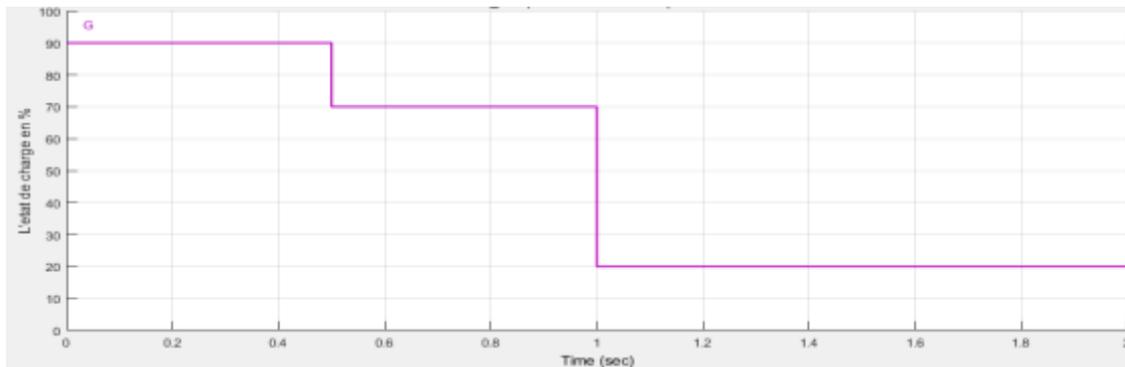


Figure 3.64 : L'état de charge de la batterie (en %)

- Mode P. Limitée : (de 0 à 0.5s) batterie déconnectée et P_{pv} constante.
- Mode Normal : (de 0.5 à 1s).
- Mode à état de charge faible :
 - La charge prioritaire est alimentée, la batterie est déconnectée. (de 1 à 1.5s)
 - La charge prioritaire est alimentée, la batterie se charge. (de 1.5 à 2s)

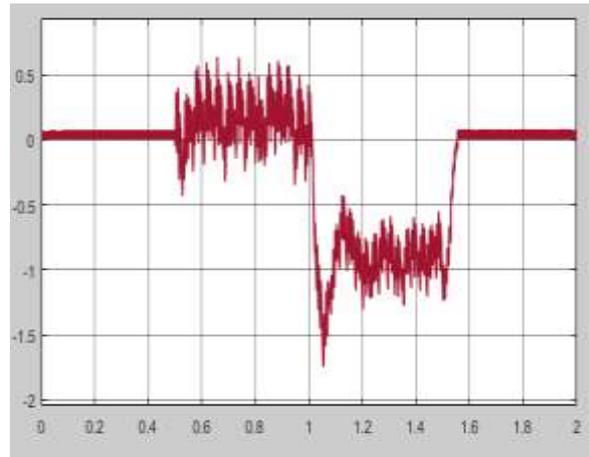
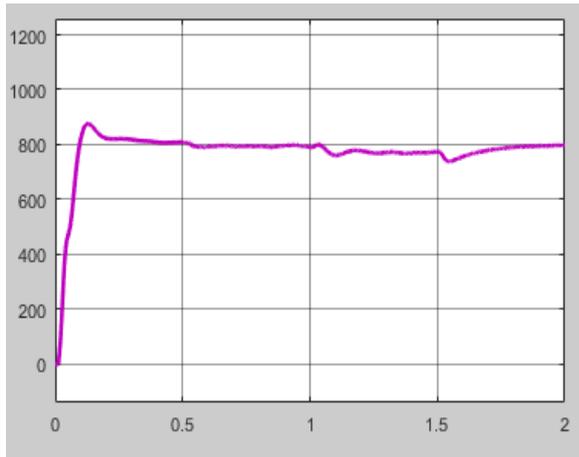


Figure 3.65 : La tension du bus continu (V)

Figure 3.66 : le courant de la batterie (A).

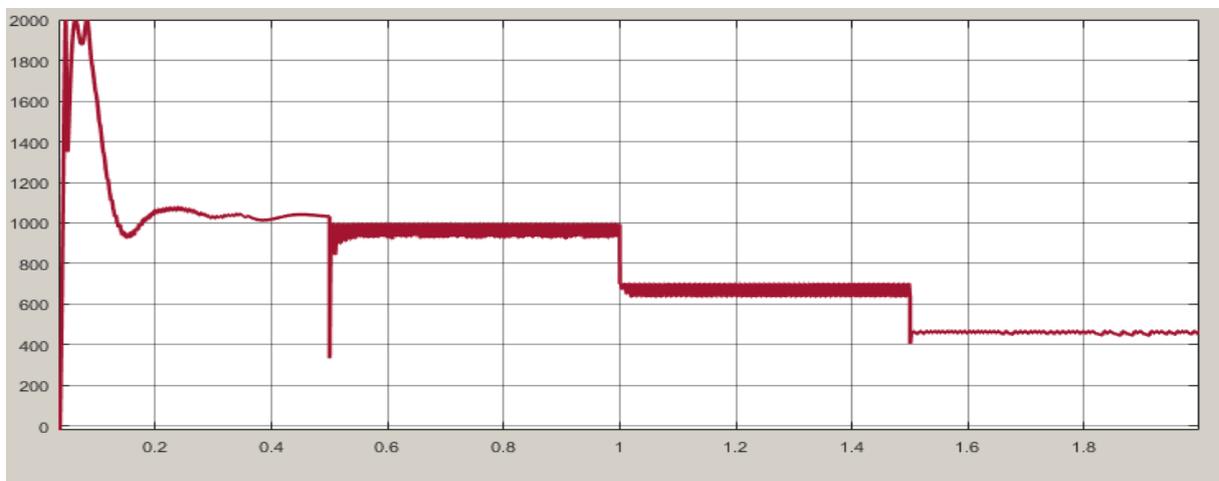


Figure 3.67 : La puissance produite par le PV (en W)

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons exposé les différentes stratégies des commandes qu'on les a utilisé, pour chaque convertisseur, l'MPPT pour le hacheur survolteur, le régulateur PI et le régulateur à mode de glissement pour le hacheur Buck-boost et finalement pour l'onduleur on a appliqué le MLI sinusoïdales, l'injection du troisième harmonique et la commande SVM. Chaque technique a ses propre avantages et inconvénients, et à travers les simulations on a choisi la meilleure stratégie pour notre système.

Dans le dernier chapitre, on va voir l'implémentation de ces commandes sur la carte ARDUINO DUE, puis on va faire une étude expérimentale pour valider cette implémentation et déterminer ces performances.

Chapitre 04 :

Etude expérimentale

Introduction

Afin de valider les résultats théoriques, qui ont montrée dans le chapitre précédent et qu'on les a simulé sous l'environnement Matlab/Simulink, nous avons réalisé la chaîne PV, et nous avons commandé les différents convertisseurs de cette chaîne. Afin de valider la ressemblance des caractéristiques électrique d'un module PV, nous avons implémenté la commande MPPT (la technique de recherche du point de puissance maximale) et la commande du régulateur PI (proportionnel intégral), finalement la commande SVM pour l'onduleur triphasée.

Dans ce chapitre, et en premier lieu, une partie sera consacrée à l'explication des différentes parties du banc d'essai, puis on va entamer les résultats de l'implémentation des commandes, en interprétant les différents signaux et les différentes mesures des tensions et courants.

4.1.Description du banc d'essai :

Le système est construit au laboratoire des équipements solaire à L'UDES (Unité de Développement des Equipements Solaires), qui est constitué :

- D'un émulateur PV (Magna Power Electronics 600V / 24A).
- D'une paillasse équipé par :
 - une alimentation $\pm 15V$, et une alimentation continu variable 0 à 270V.
 - des charges variables résistives, capacitive et inductives.
- D'un onduleur triphasé et un filtre LC.
- Des trois charges résistives de $33\Omega / 6A$.
- Des quatre batteries (12V-9Ah).
- Des hacheurs que nous avons réalisés : 1- Convertisseur Boost
2-Convertisseur Buck-Boost.



Figure 4.1 : La plateforme expérimentale

4.2.L'émulateur PV :

Le logiciel PPPE (Photovoltaic Power Profile Emulation) calcule automatiquement les profils de tension et de courant des panneaux solaires en fonction de paramètres définis par l'utilisateur. Ces profils peuvent être envoyés séquentiellement à une alimentation Magna-Power Electronics, qui émule des caractéristiques définies. L'utilisateur peut définir un nombre illimité de profils à émuler et à séquencer sur une période donnée.

La conception et la validation de la production pour l'électronique connectée photovoltaïque nécessite une source d'énergie émulative photovoltaïque avec des caractéristiques de sortie flexibles. Les onduleurs et les convertisseurs CC-CC spécialisés utilisent des algorithmes de contrôle MPPT (Maximum Power Tracking) pour optimiser l'utilisation des sources d'énergie non linéaires, telles que les panneaux solaires. Pour le développement et la fabrication, l'utilisation de matrices photovoltaïques pour la validation est coûteuse avec des caractéristiques de source incontrôlées. En utilisant une alimentation avec des caractéristiques de sortie programmables par l'utilisateur, l'utilisateur peut évaluer la gamme complète des conditions de puissance.



Figure 4.2 : L'émulateur PV (Magna Power Electronics 600V / 24A).

En utilisant une alimentation avec des caractéristiques de sortie programmables par l'utilisateur, l'utilisateur peut évaluer la gamme complète des conditions de puissance. Une fois le profil défini, il peut être transféré à l'alimentation pour une émulation statique ou dynamique. Un paramètre dépendant du temps définit combien de temps l'alimentation doit émuler ce profil avant de charger le profil suivant dans la séquence.

4.2.1. Modélisation et fonctionnement

Un profil est une courbe tension / courant que la sortie de l'alimentation doit émuler. Il existe trois méthodes pour générer un profil de puissance dans le logiciel PPPE :

4.2.2. Automatique, basée sur les paramètres du réseau solaire

L'utilisateur sélectionne la technologie de panneau solaire souhaitée, la température nominale, l'irradiance, la tension et les valeurs de courant. Chaque profil V-I n'est alors défini que par de nouvelles valeurs de température et d'irradiance. Le reste des paramètres: point de puissance maximale (V_{mp} , I_{mp}), tension de circuit ouvert (V_{oc}) et courant de court-circuit (I_{sc}); sont tous calculés automatiquement conformément à la norme EN50530.

4.2.3. Automatique, basé sur 4 paramètres

L'utilisateur définit le point de puissance maximal (V_{mp} , I_{mp}), la tension de circuit ouvert (V_{oc}) et le courant de court-circuit (I_{sc}). Le profil est ensuite généré en fonction de ces paramètres.

4.2.4. Manuel

L'utilisateur définit jusqu'à 50 points de courant et de tension pour l'alimentation à émuler. L'alimentation électrique effectue une approximation linéaire par morceaux entre les points pour fournir une courbe de sortie lisse.

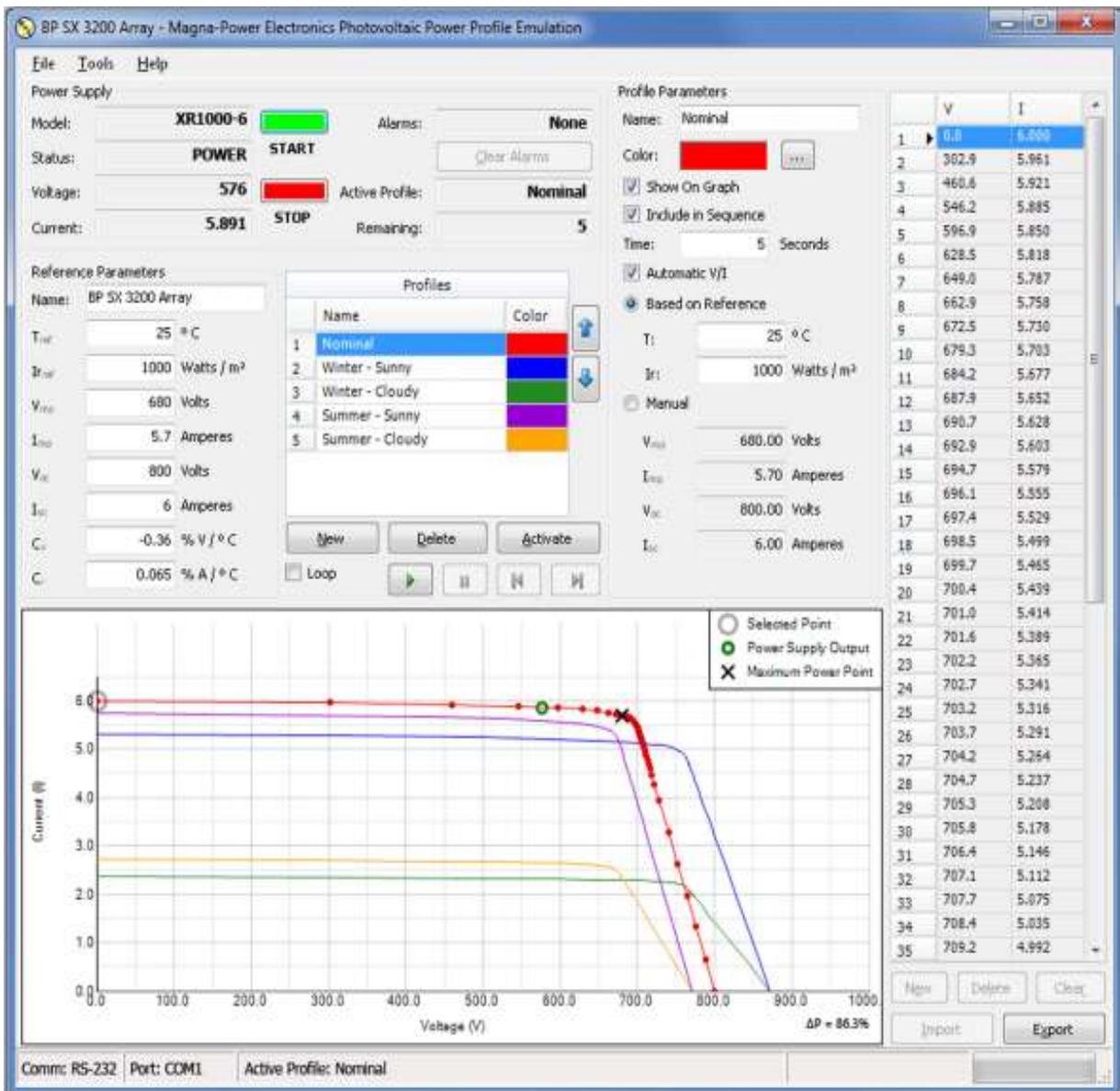


Figure 4.3 : L'interface de l'émulateur PV.

4.3.Le hacheur Boost

4.3.1. Circuit de puissance :

Ce convertisseur DC/DC sera utilisé pour l'implémentation de la commande MPPT. C'est un hacheur non-réversible. Il est composé de deux interrupteurs, un transistor et une diode. Les deux composants doivent supporter une tension environ de 1000 volts, et doivent pouvoir conduire un courant de plus de 10A. Durant leurs commutations, ils se chauffent, et ils atteignent une température très élevée, pour cela on met un refroidisseur pour les refroidir et éviter leurs détérioration.



Diode et transistor

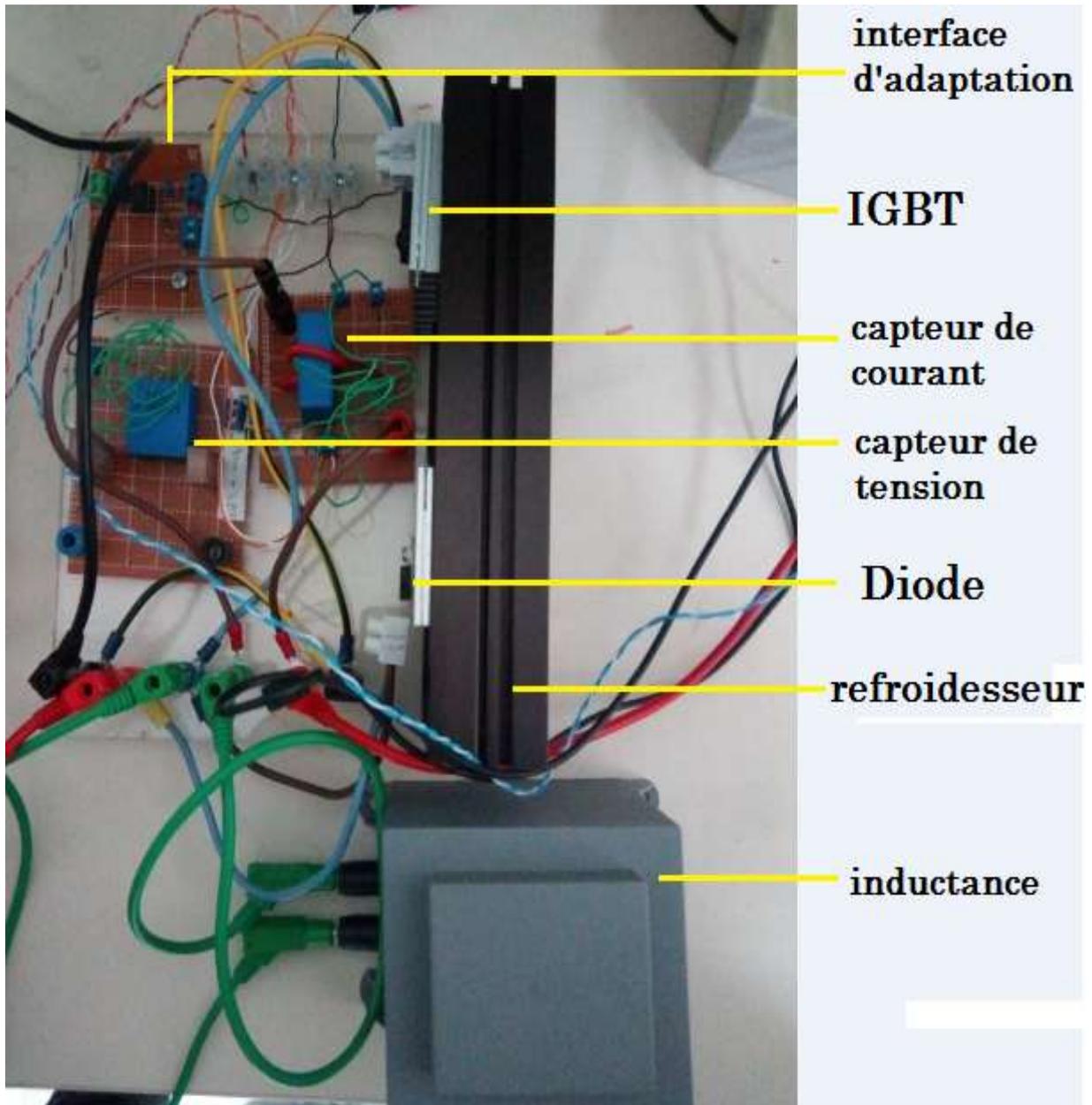


Figure 4.4 : Le hacheur survolteur.

4.3.1.1.IGBT (K40T1202) :

On a choisi ce type de technologie (IGBT : Insulate Gate Bipolar Transistor) à partir du diagramme de puissance-fréquence des semi-conducteurs [Annexe A]., autrement dit l'IGBT est le meilleur interrupteur pour notre application.

Les caractéristiques essentielles de l'IGBT choisi extraites du datasheets imposé par le constructeur (Infineon) sont :

V_{GE} = de 12 V jusqu'à 15 V.

Type	V_{CE}	I_C	$V_{CE(sat,T=25^{\circ}c)}$	$T_{j,Max}$	Le code de marketing	Package
IKW40N120T2	1200 V	40 A	1.75 V	175°C	K40T1202	PG-TO-247-3

Tableau 4.1 : Caractéristique d'IGBT.

4.3.1.2. Diode:

Les caractéristiques essentielles de la diode choisie **BYT30P-1000** extraites du datasheets imposé par le constructeur (Infineon) sont :

Cathode connected to case



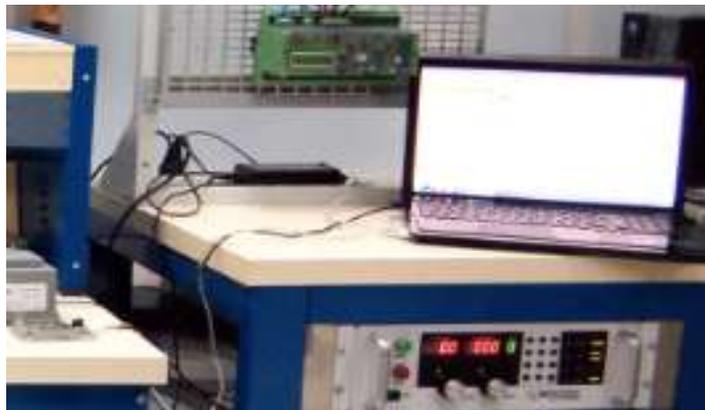
- Capacité de tension inversée très élevé.
- Temps de récupération très court.
- Perte de commutation très faible.
- Commutation de bas bruit.

Symbole	Paramètre	Valeur /unité
V_{RRM}	Tension inverse crête répétitive	1000 V
V_{RSM}	Tension inverse crête non répétitive	1000 V
I_{FRM}	Courant de pointe répétitif $t_p < 10 \mu s$	375 A
$I_{F(RMS)}$	Courant direct RMS	70 A
$I_{F(AV)}$	Courant direct moyen $t_c = 85^{\circ}c / \delta = 0.5$	30 A
$R_{th(j-c)}$	Cas de jonction	1 °C/W

Tableau 4.2 : Caractéristique de la diode

Unité de commande :

Constituée de la carte ARDUINO DUE, sur laquelle nos commandes sont implémentées, et un PC debugger muni de l'environnement de développement intégré d'ARDUINO, afin de programmer, compiler et Téléverser le programme dans la carte Arduino.



4.3.2. Circuit de commande :

On sait que les signaux de commande sont de tension de 3.3V et la gâchette se commande par une tension de 12V jusqu'à 15V, donc on a besoin de l'amplifier le signal de commande, cette fonction est assurée par l'interface d'adaptation qui contient principalement un optocoupleur.

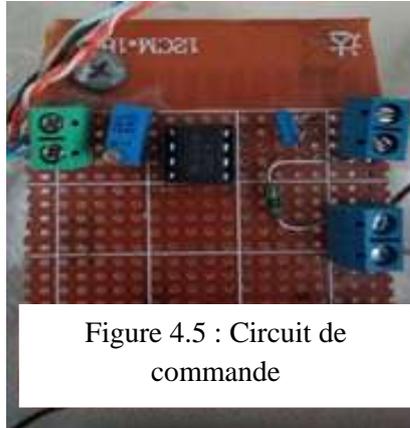


Figure 4.5 : Circuit de commande

L'optocoupleur HCPL 3101 :

Le HCPL-3100/3101 est constitué d'une LED optiquement couplée à un circuit intégré avec une sortie de puissance à étape. Ces optocoupleurs sont adaptés à la conduite MOSFET de puissance et IGBT utilisés dans les applications d'onduleur de contrôle de moteur.

La gamme de haute tension de fonctionnement de l'étage de sortie fournit les entraînements de tension requis par des dispositifs commandés par des portes. La tension et le courant fournis par ces optocoupleurs permettent directement l'interfaçage avec le dispositif d'alimentation sans avoir besoin d'un étage amplificateur intermédiaire.

À partir du datasheet on construit l'interface d'adaptation.

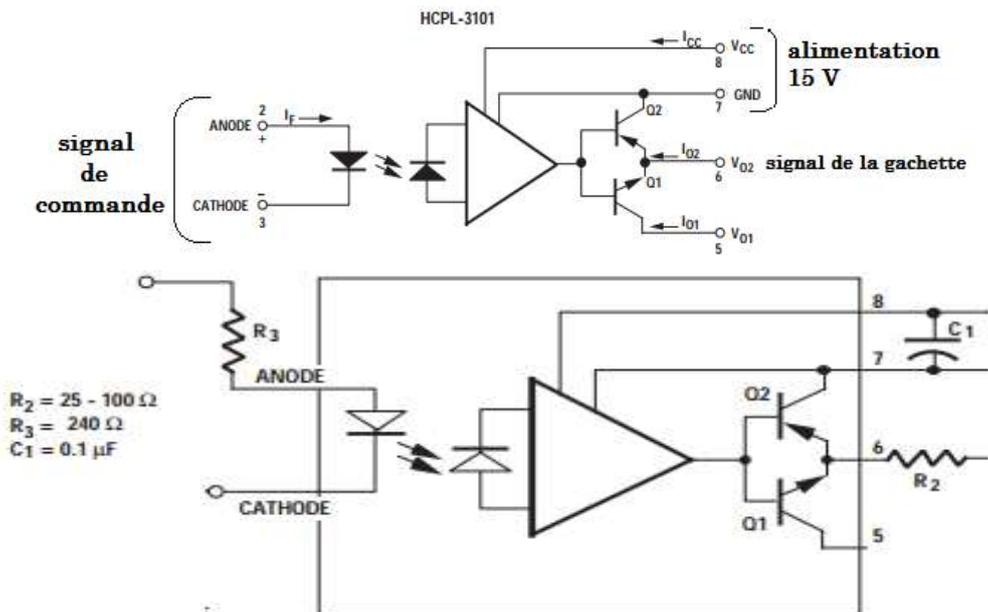
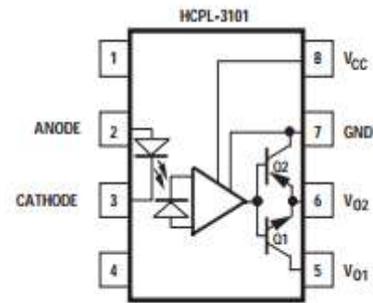


Figure 4.6 : Schéma de circuit de commande

4.3.3. Mesures et instruments :

4.3.3.1. Cartes de mesures de tensions et de courants :

On a intégré dans le circuit du hacheur boost deux capteurs, où on va les utiliser afin de récupérer la tension et le courant du panneau PV, parce qu'on a besoin de ces grandeurs dans le programme de l'MPPT.

Effet de hall à boucle fermée :

Lorsqu'un métal ou un semi-conducteur parcouru par un courant I est placé dans une induction magnétique B perpendiculaire à la direction de ce courant crée un flux magnétique primaire, il apparaît une différence de potentiel dans le matériau appelée «tension Hall». Un amplificateur différentiel qui convertit la tension hall V_H en un courant I_s qui parcourt le bobinage secondaire. Ce courant secondaire multiplié par le nombre de spires N_s du bobinage secondaire annule exactement le flux magnétique primaire (contre-réaction ou boucle fermée).

$$\text{Donc: } I_p = \frac{N_s}{N_p} * I_s.$$

4.3.3.2. Capteur du courant LA25-P:

Principe de fonctionnement :

Ce capteur de courant est un transformateur électronique utilisant le phénomène dit « Effet de hall à boucle fermée ».

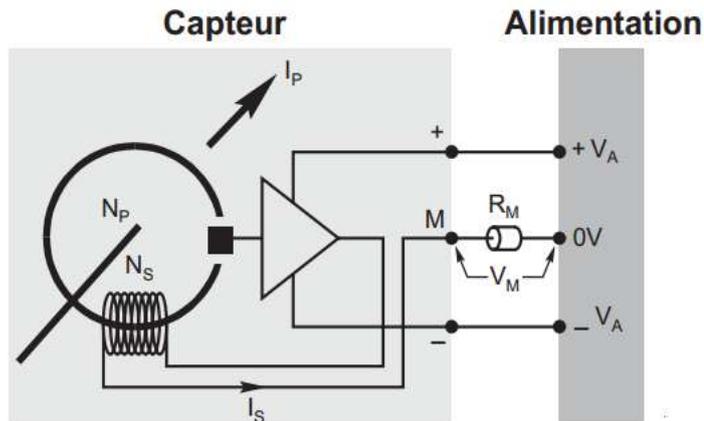


Figure 4.7 : Le capteur de courant.

Le courant secondaire I_s est donc l'image exacte du courant I_p à mesurer. L'insertion d'une résistance de mesure R_m en série avec l'enroulement secondaire permet de récolter une tension à l'image du courant à mesurer.

$$\text{Donc : } V_m = R_m * I_s = R_m * \frac{N_p}{N_s} * I_p.$$

Le LA25-P, commercialisé par la société LEM. Les principales caractéristiques données par le constructeur pour une alimentation symétrique de $\pm 15V$ sont les suivantes :

N_p/N_s	1/1000
R_s	80 Ω ($T_A = 70^\circ C$)
I_{pN}	25A
I_{sN}	25mA

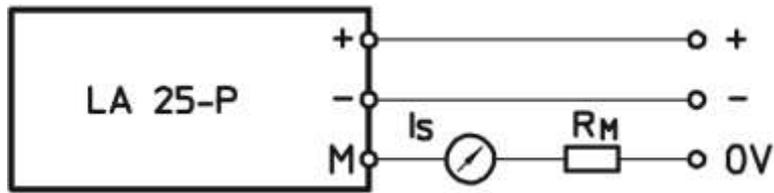


Figure 4.8 : Schéma du montage de capteur

Calculons la résistance de mesure R_M :

En prenant une tension maximum de mesure de 3.3 V. (C'est la tension maximum du pin analogique Arduino due).

$$R_m = V_m / I_{sn} = 132 \Omega.$$

4.3.3.3. Capteur de la tension LV25-P:

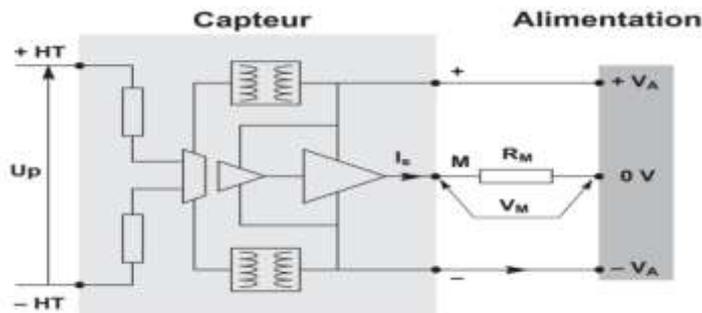


Figure 4.9 : Le capteur de la tension.

De la même manière que pour les capteurs de courant, il est alors possible de faire débiter le courant secondaire I_s à travers une résistance de mesure R_M . La tension de mesure V_M aux bornes de cette résistance de mesure R_M est alors l'image de la tension primaire U_P .

Le LV25-P, commercialisé par la société LEM. Les principales caractéristiques données par le constructeur pour une alimentation symétrique de $\pm 15V$ sont les suivantes :

N_p/N_s	2500/1000
R_s	110 Ω ($T_A = 70^\circ C$)
V_{pN}	500V
I_{pN}	10 mA
I_{SN}	25 mA

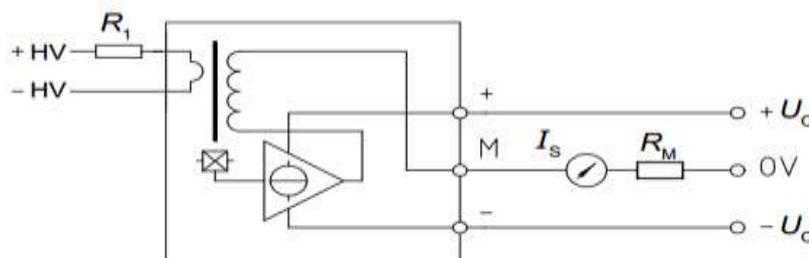


Figure 4.10 : Schéma du montage de capteur de la tension.

Le dimensionnement des éléments du capteur de tension revient au calcul de la résistance placée au primaire R_1 et de la résistance de mesure secondaire R_m .

Calcul de la résistance de puissance R_1 :

Le choix de la résistance R_1 , montée en série avec l'enroulement primaire dépend surtout de la tension maximale à mesurer et cela en ajustant le courant I_{pN} .

Donc : $R_1 = \frac{V_{pN}}{I_{pN}} = 50 \text{ k}\Omega$.

Calcul de la résistance de mesure R_M :

En prenant une tension maximum de mesure de 3.3 V. (C'est la tension maximum du pin analogique Arduino due).

$R_m = V_m / I_{sn} = 132 \Omega$.

4.3.3.4. Alimentation stabilisé et l'oscilloscope :



Figure 4.11 : Alimentation stabilisée

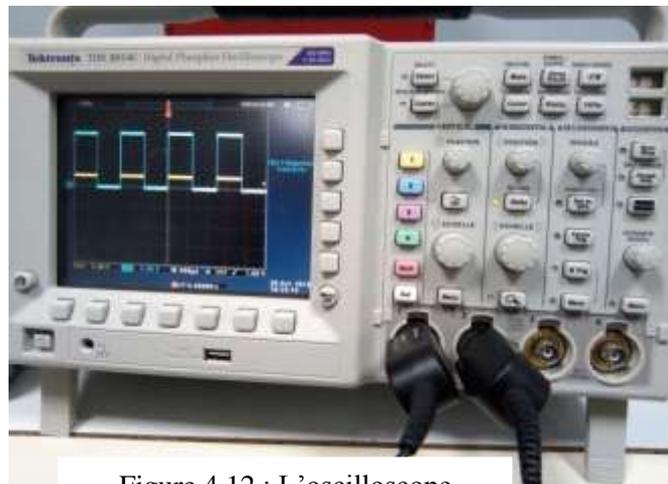


Figure 4.12 : L'oscilloscope

4.3.4. L'inductance :

*Self Monophase
Fabricant : LANGLOIS
Norme NFC 62300
Reference : SM96444
Inductance 3mH
Intensité : 20A*



Figure 4.13 : L'inductance

4.4. La charge résistive: 3 charges de $33\Omega/6A$, on peut les utiliser comme une charge triphasée ou comme une charge DC.



Figure 4.14 : Les 3 charges $33\Omega / 6A$.

4.5. Résultats expérimentaux :

4.5.1. Le signal de commande délivrer par HCPL / Arduino :

Pour tester le bon fonctionnement de l'étage d'adaptation, nous avons fait un petit essai, où on a généré un signal PWM par la carte Arduino due, et on a alimenté l'optocoupleur avec 15V en utilisant l'alimentation de la paillasse, la visualisation du signal de commande et le signal amplifié été à l'aide de l'oscilloscope, le résultat apparait dans la figure ci-dessous :

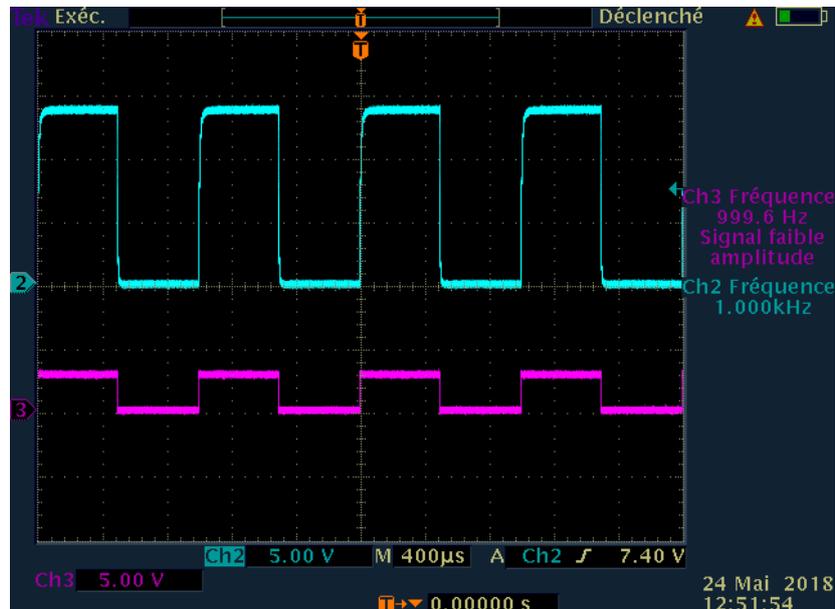


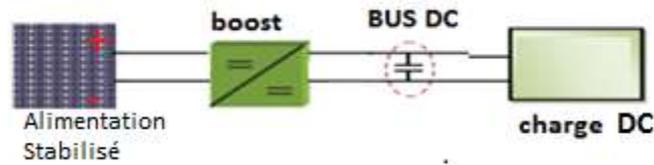
Figure 4.15 : Signal de commande $\alpha = 0.5$.

Commentaire :

On remarque que le signal de commande de l'arduino de tension 3.3 V a été bien amplifié par le HCPL avec la même fréquence ($f=1000$ Hz).

4.5.2. Test de circuit de puissance (Hacheur Boost) :

On a utilisé ce signal de rapport cyclique 0.5, pour tester le fonctionnement du hacheur boost, où nous avons utilisé la carte Arduino Due pour générer le signal de commande, la paillasse pour alimenter le HCPL, l'emulateur pour générer une tension de 30V et on a utilisé les trois charges 100Ω/6A.



Théoriquement avec ce α la tension de sortie sera le double de la tension d'entrée

$$V_e = \frac{1}{1-\alpha} V_s$$
. Donc on obtient : $V_s = 60V$

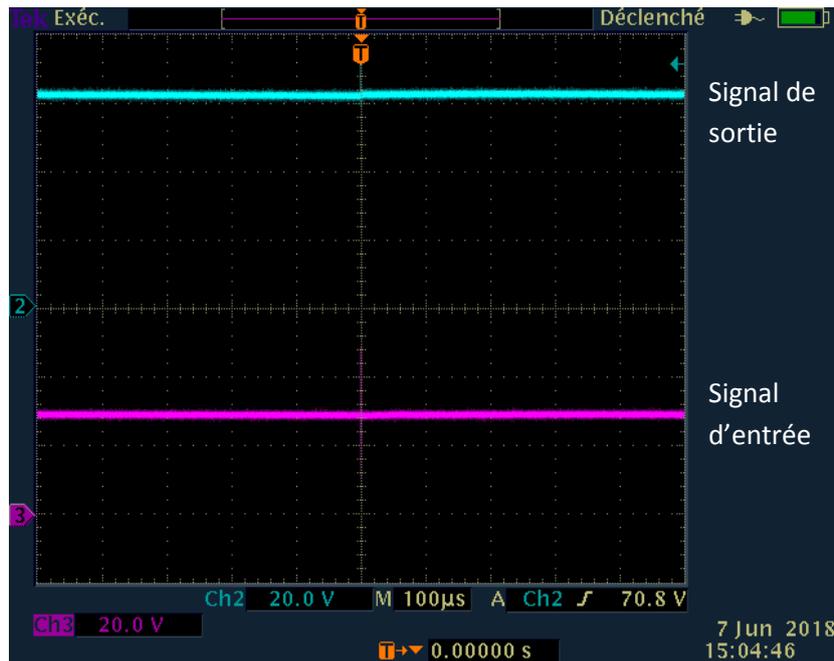


Figure 4.16 : Signal d'entrée et de sortie du hacheur

4.5.3. Implémentation de l'Algorithme MPPT :

En exploitant le module PWM de l'arduino due [Annexe C]. On génère le signal de commande de l'interrupteur en utilisant le pin digital 35 de la carte Arduino Due qui est connecté à la chaîne PWMH0.

L'impulsions de l'interrupteur est symétriques par rapport à la demi période d'échantillonnage et ils passent du niveau haut au niveau bas, donc on configure la chaîne de modulation à largeur d'impulsion (MLI) en mode alignement centré (PWM_CMRx (CPOL=1)) c'est-à-dire que le signal du sortie est au niveau haut au début du période, et passe au niveau bas lorsque la valeur du registre de compteur (PWM_CCNTx) devient supérieur à la valeur du registre (PWM_CDTYx).

En tenant compte de la fréquence d'horloge de la carte Arduino Due est de 84 MHz, et la chaîne est configurées en alignement centré on peut calculer la fréquence d'échantillonnage de 1 kHz par la relation ci-dessous et on charge le registre PWM_CPRD0 par la valeur :

$$PWM_CPRD0 = \frac{84 \cdot 10^6}{2 \cdot 1 \cdot 10^3} = 42000.$$

Sous-programme d'interruption

On active la génération automatique de l'interruption à chaque début de période puis mettre à jour le rapport cyclique. Dans cette fonction, on va :

- Mesurer le courant et la tension du PV.
- Calculer la puissance.
- Calculer le nouveau rapport cyclique pour la chaîne PWMH0 en incrémente ou en décrémente le rapport cyclique précède en fonction de la variation de la puissance.
- Charger le registre tampon PWM_CDTYUPD0 pour actualiser le rapport cyclique au début du prochaine période d'échantillonnage. Cette méthode a pour but d'avoir une durée d'impulsion précise, et ne dépend pas par le temps d'exécution du programme.

La structure du programme :

Void setup()

Initialiser la sortie PWMH0

Initialiser la chaîne PWMH0 (période, alignement centré et polarité)

Générer l'interruption à chaque début de période.

Void interrupt()

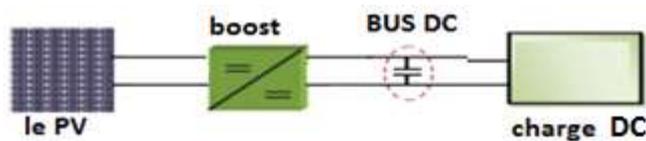
Void loop()

Mesurer le courant et la tension du PV.

Calculer la puissance.

Actualiser le rapport cyclique de la chaîne PWMH0 en fonction P_n et P_{n-1}

A fin de valider l'algorithme MPPT, on a fait le montage ci-dessous :



Où on a utilisé la carte Arduino Due pour générer le signal de commande, la paillasse pour alimenter les HCPLs, l'alimentation stabiliser pour alimenter les capteurs et on a utilisé les trois charge 100Ω/6A.

Et en utilisant le logiciel de l’émulateur, on a pu de voir les performances de cet algorithme parce que le logiciel :

- ✓ Trace la caractéristique de I_{pv}/V_{pv} et P_{pv}/V_{pv} selon les données (paramètres du panneau et les conditions météorologiques) que l'utilisateur a inséré.
- ✓ Il indique aussi le point de maximum puissance.
- ✓ Le point de fonctionnement.
- ✓ Il calcule le rendement.
- ✓ Il affiche aussi le variation du tension et du courant sur le graphe I_{pv}/V_{pv} et P_{pv}/V_{pv} .
- ✓ Il trace I_{pv} , V_{pv} , P_{pv} en fonction du temps.

Les paramètres qu'on a pris sont :

Tech:	cSi	
T_{ref}	25	°C
I_{ref}	1000	Watts / m ²
V_{mp}	74.02	Volts
I_{mp}	3.785	Amperes
V_{oc}	87.98	Volts
I_{sc}	4.07	Amperes
β	-0.4	% V / °C
α	0.04	% A / °C

Open circuit voltage V_{oc} (V)	87.98
Short-circuit current I_{sc} (A)	4.07
Voltage at maximum power point V_{mp} (V)	74.02
Current at maximum power point I_{mp} (A)	3.785
Temperature coefficient of V_{oc} (%/deg.C)	-0.4
Temperature coefficient of I_{sc} (%/deg.C)	0.004
Puissance maximale (W)	280.1657

Tableau 4.3 : Les paramètres du PV.

Concernant l’irradiation et la temperature on a fait des essais pour des valeurs différentes. Dans un premier temps on a choisi 1000 W/m² et 25°C. puis on a fait des séquences de 25 secondes dans chaque, où on varie la temperature ou l’irradiation ou les deux à la fois.

Les résultats obtenus sont comme suit :

- Sans MPPT (sans commande $\alpha = 0$):

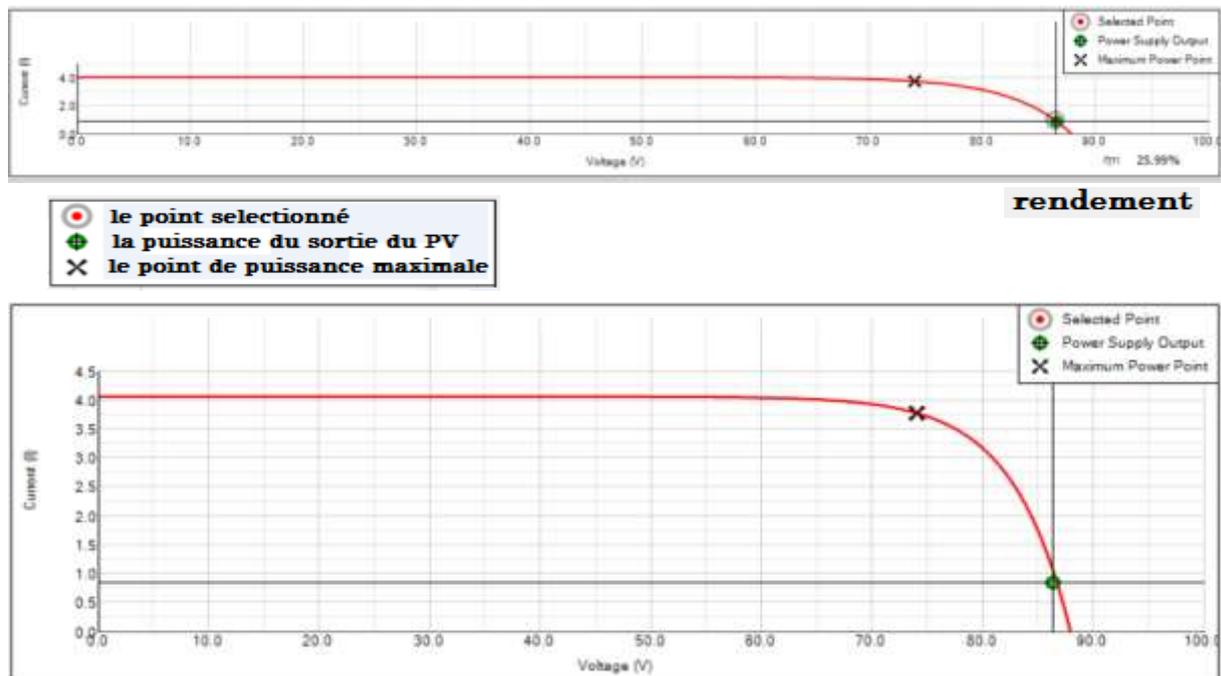


Figure 4.17 : Le courant en fonction de la tension

La figure montre que le rendement est environ de 26%, car la puissance extraite de la PV est environ $86 \times 0.85 = 73W$, ce point reste fixe et il est très loin du point de puissance maximale.

➤ Avec MPPT :

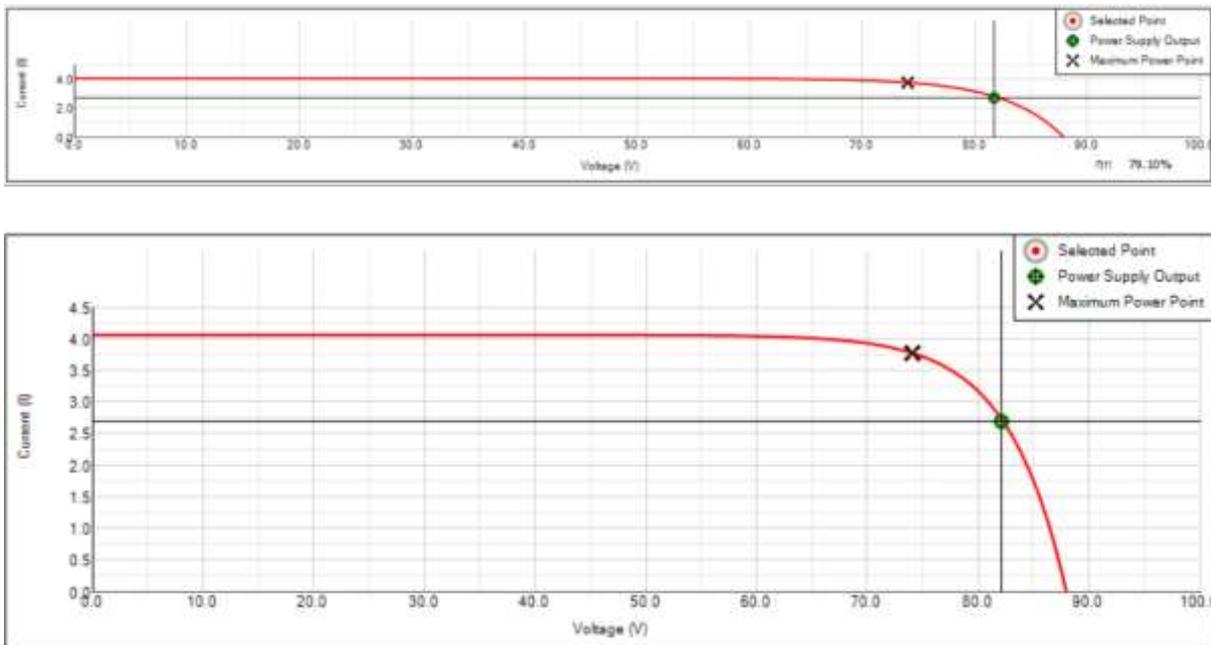


Figure 4.18 : Le courant en fonction de la tension

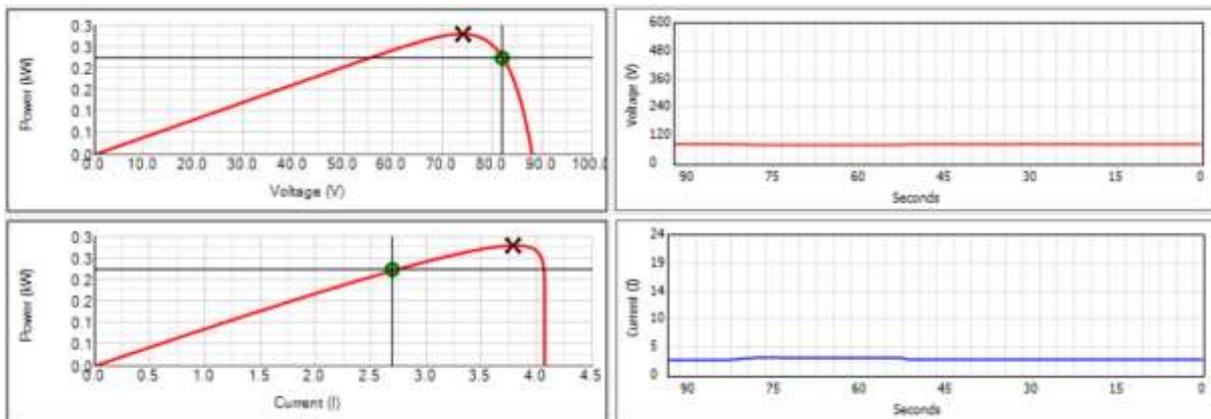


Figure 4.19 La puissance en fonction de la tension et du courant

La tension et du courant en fonction du temps

La figure montre que la puissance du PV est proche de la puissance maximale, avec un rendement de environ de 79.20%, et la puissance extraite de la PV est environ $82 \times 2.4 = 252W$.

4.6.L'onduleur :

Le convertisseur DC/AC de notre plateforme expérimentale est un onduleur SEMISTACK-IGBT du SEMIKRON. Il est conçu à partir des modules IGBT SKM50GB123D de la société SEMIKRON. Ces IGBTs sont pilotés par des drivers de référence SKHI22A distribués également par la société SEMIKRON. Cet dispositif didactique permet d'émuler la plupart des applications industrielles comme :

- ❖ Onduleur triphasé.
- ❖ Hacheur de freinage et hacheur Buck ou Boost.

❖ Onduleur monophasé et Onduleur redresseur mono ou triphasé.

Les trois signaux de commande et leurs signaux complémentaires et les temps morts de l'onduleur sont générés par un module. Ce dernier représente l'étage d'adaptation entre le circuit de commande (Arduino, DSP, DSpace ...) et le circuit de puissance, il contient également un driver et une isolation. Le temps mort assuré par l'interface d'adaptation est 5µs.

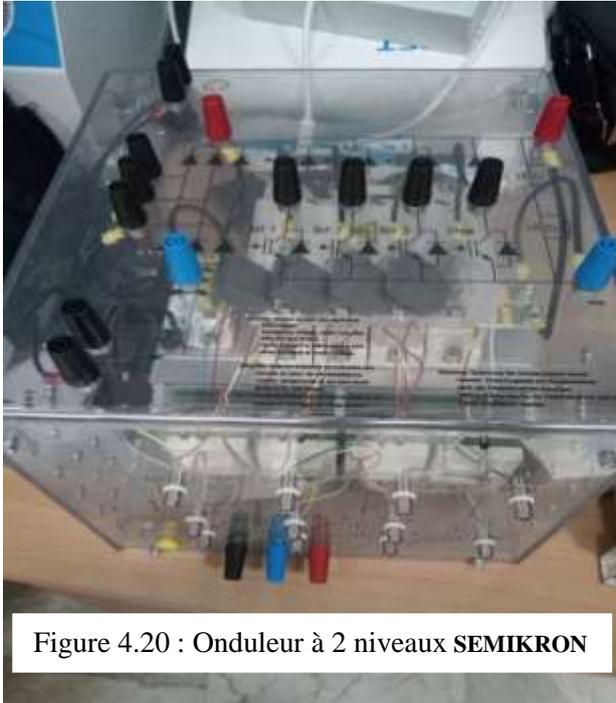


Figure 4.20 : Onduleur à 2 niveaux SEMIKRON

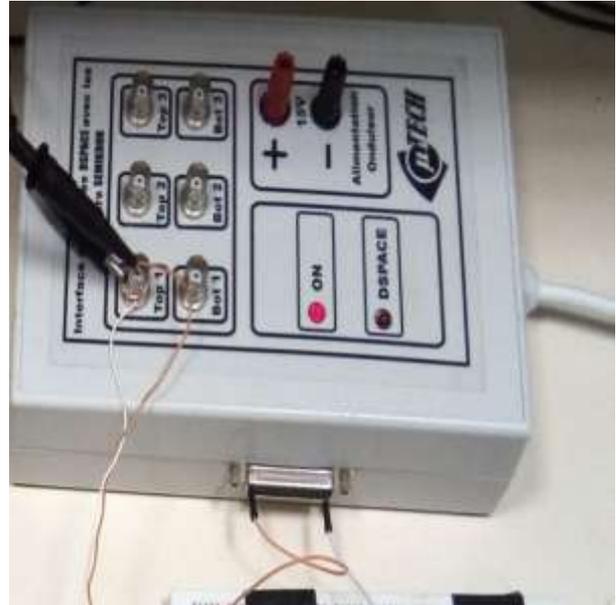


Figure 4.21 : Interface d'adaptation

4.6.1. Le Filtre LC :

Un filtre LC est inséré entre la charge et l'onduleur. Ce dispositif permet de convertir la tension de sortie rectangulaire PWM, en une onde sinusoïdale avec faible ondulation résiduelle afin d'améliorer la qualité des tensions de sortie de l'onduleur et pour diminuer les harmoniques fréquentiel.

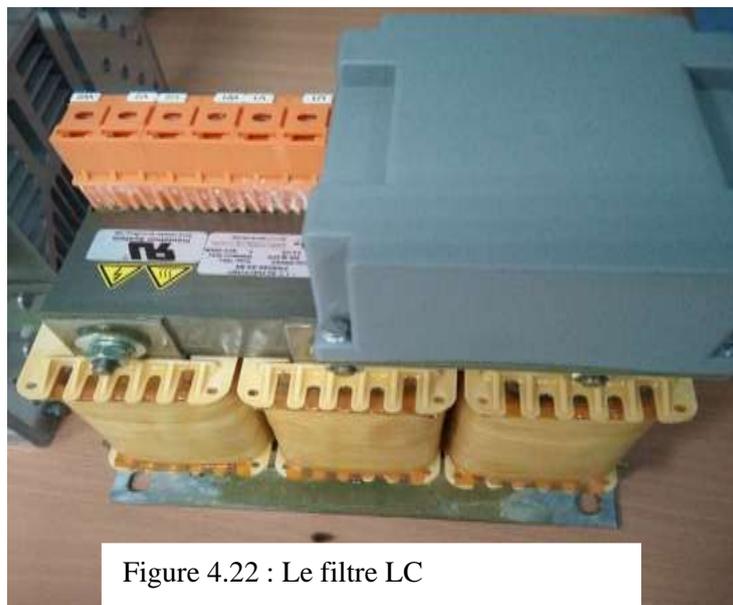


Figure 4.22 : Le filtre LC

4.6.2. Résultats expérimentaux :

4.6.2.1. Retard entre deux signaux complémentaires :

Une mesure pratique à l'aide de l'oscilloscope a permis de visualiser les deux signaux complémentaires.

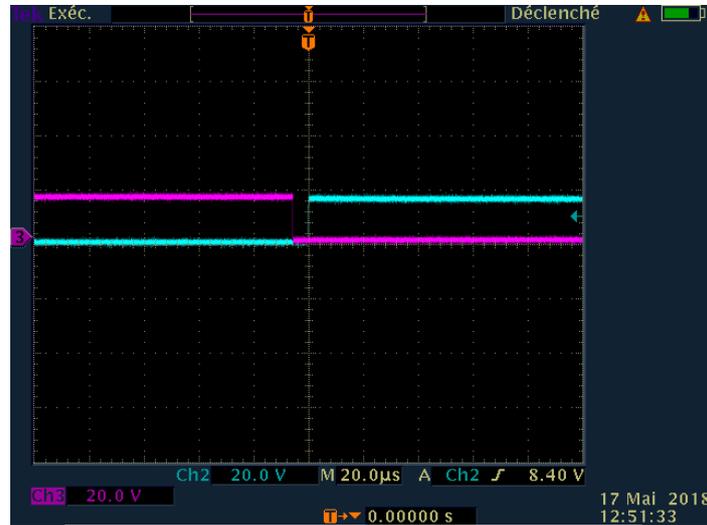


Figure 4.23 : Retard généré par l'interface d'adaptation

La visualisation a permis d'évaluer le temps mort qui est de 5 μ s.

4.6.2.2. Implémentation de l'algorithme SVM :

En exploitant le module PWM de l'arduino due [Annexe C]. On utilise les Pin digitaux 35, 37 et 39 de la carte Arduino Due qui sont connectés aux chaînes PWMH0, PWMH1, et PWMH2 respectivement, pour générer les signaux de commande des trois bras a, b et c respectivement de l'onduleur.

Les impulsions des interrupteurs sont symétriques par rapport à la demi période d'échantillonnage et ils passent du niveau bas au niveau haut, donc on configure la chaîne de modulation à largeur d'impulsion (MLI) en mode alignement centré avec une polarité positive (PWM_CMRx(CPOL=0)) c'est-à-dire que le signal de sortie est au niveau bas au début de la période, et passe au niveau haut lorsque la valeur du registre de compteur (PWM_CCNTx) devient supérieure à la valeur du registre (PWM_CDTYx).

En tenant compte de la fréquence d'horloge de la carte Arduino Due est de 84 MHz, et la chaîne est configurée en alignement centré on peut calculer la fréquence d'échantillonnage de 4 kHz par la relation (1.1) et on charge le registre PWM_CPRD6 par la valeur :

$$PWM_CPRD0 = PWM_CPRD1 = PWM_CPRD2 = \frac{84 \cdot 10^6}{2 \cdot 4 \cdot 10^3} = 10500 .$$

Sous-programme d'interruption :

On active la génération automatique de l'interruption à chaque début de période pour mettre à jour le rapport cyclique. Dans cette fonction, on va :

- Calculer l'argument du vecteur de la tension de référence à l'aide d'un temporisateur de la carte Arduino Due.

- Déterminer le secteur par une division de l'argument du vecteur de la tension de référence par $\pi/3$
- Déterminer les vecteurs à appliqués en fonction du secteur.
- Calculer les durées T1 et T2 à partir des équations 1.1 et 1.2.
- Calculer la durée T0 à partir de l'équation 1.3.
- Calculer le rapport cyclique pour chaque chaîne PWM0, PWMH1 et PWMH2 en fonction des vecteurs à appliqué, et les durées T0, T1 et T2.

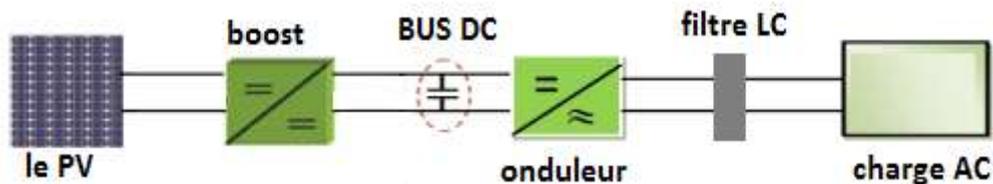
Chargement du registre tampon PWM_CDTYUPD0, PWM_CDTYUPD1 et PWM_CDTYUPD2 pour actualiser le rapport cyclique de chaque chaîne PWM0, PWM1, PWM2 dans le début de chaque période d'échantillonnage.

La structure du programme est comme suit :

Void setup()
 Initialisation des sorties PWMH0,PWMH1 et PWMH2.
 Initialisation des chaînes PWMH0, PWMH1 et PWMH2 (période, alignement centré et polarité)
 Génération d'interruption à chaque début de période.
 Void interrupt()

Void loop()
 Calcul de la phase du Vref
 Détermination du secteur.
 Calcul des temps d'applications des vecteurs T_i , T_{i+1} et T_z
 Actualisation des rapports cycliques des chaînes PWMH0, PWMH1 et PWMH2 en fonction des vecteurs V_i et V_{i+1} et en fonction des temps d'application de ces derniers T_i , T_{i+1} et T_z .

Pour tester ce programme, on a fait le montage suivant :



Et on a obtenu comme résultat : Les signaux de commande S1, S2, S3 générée par la carte ARDUINO DUE pour les interrupteurs sont comme suit :

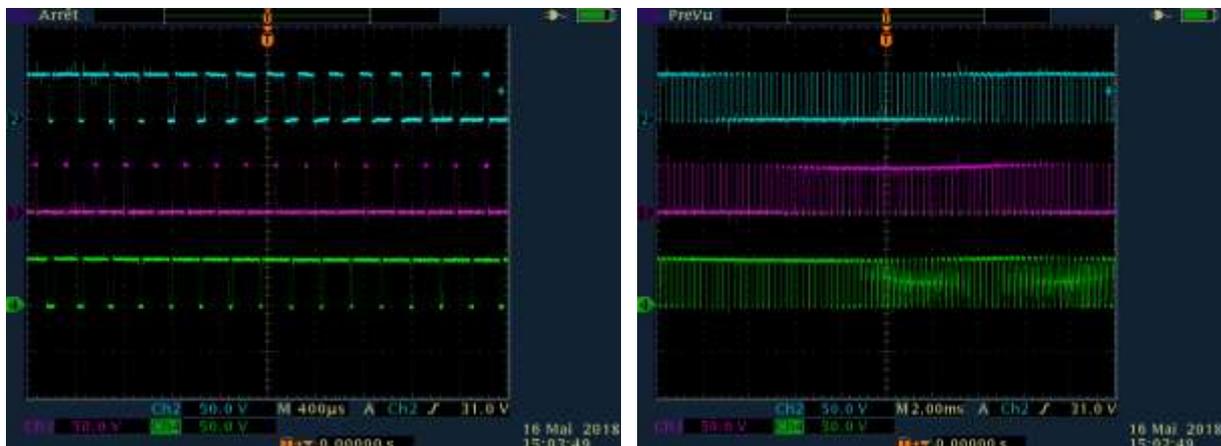


Figure4.24 : Tensions des bras de l'onduleur V_{1M} , V_{2M} , V_{3M} .

Les trois tensions des bras sont déphasées entre eux de $2\pi/3$ et prennent deux valeurs différentes (0 ou V_{dc}).

Les états des Signaux de commande :

Les signaux de commande (respectivement de haut vers le bas résultat théorique, de simulation et expérimentale), en affichant par secteur :

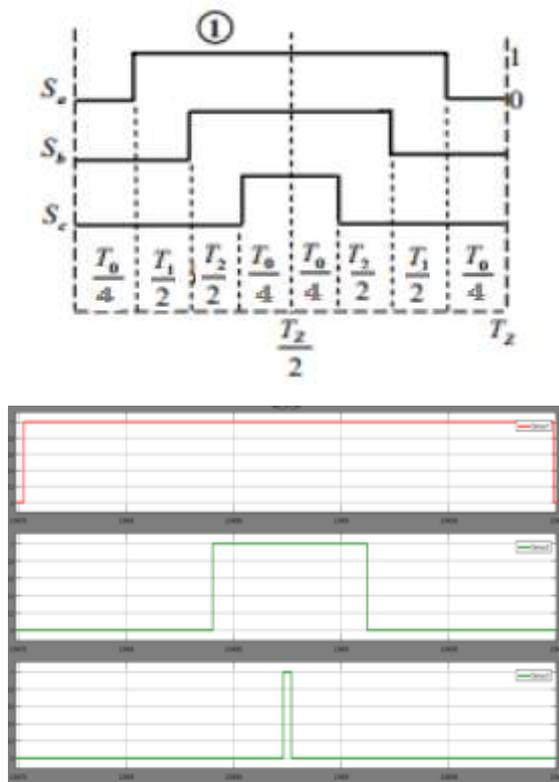


Figure 4.25 : Le premier secteur

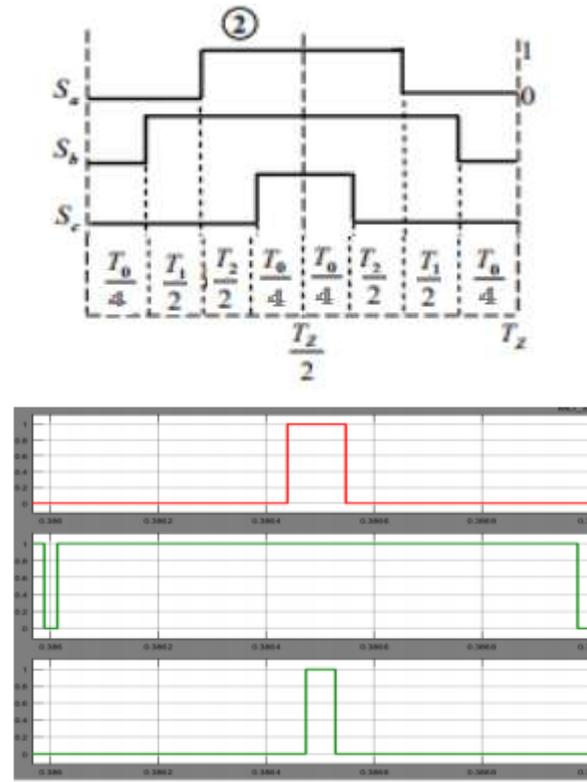


Figure 4.26 : Le deuxième secteur

Remarque :

Pour les deux premiers secteurs on remarque que les résultats des signaux de commande expérimentaux sont proche des résultats de la simulation ainsi que les résultats théoriques. Ce qui confirme la validation de notre implémentation de l'algorithme SVM.

On remarque que les impulsions générées par la carte ARDUINO DUE sont symétriques par rapport à la demi-période d'échantillonnage, avec une fréquence de 1KHz.

Les deux figures (4.27) et (4.28) suivantes correspondent aux signaux de commande des interrupteurs des bras de l'onduleur du troisième et du quatrième secteur où les signaux ont des largeurs d'impulsion différents des deux premiers secteurs.

Les résultats des signaux de commande expérimentaux sont proche des résultats de la simulation ainsi que les résultats théoriques.

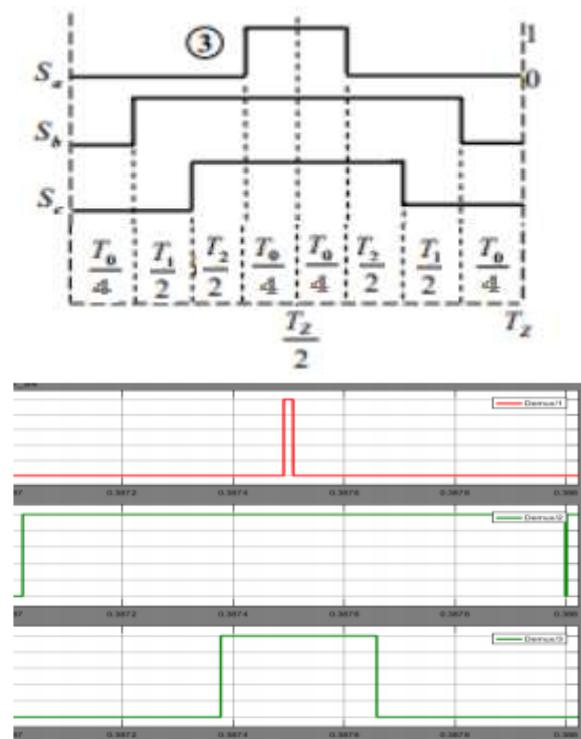


Figure 4.27 : Le troisième secteur

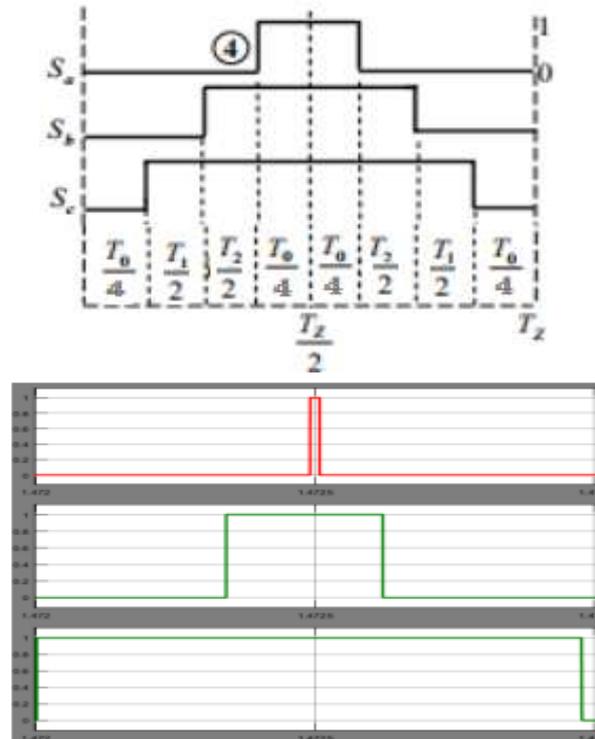


Figure 4.28 : Le quatrième secteur

Les deux figures (4.29) et (4.30) suivantes correspondent aux signaux de commande des interrupteurs des bras de l'onduleur du cinquième et du sixième secteur où les signaux ont des largeurs d'impulsion différents des deux premiers secteurs.

Les résultats des signaux de commande expérimentaux sont proche des résultats de la simulation ainsi que les résultats théoriques.

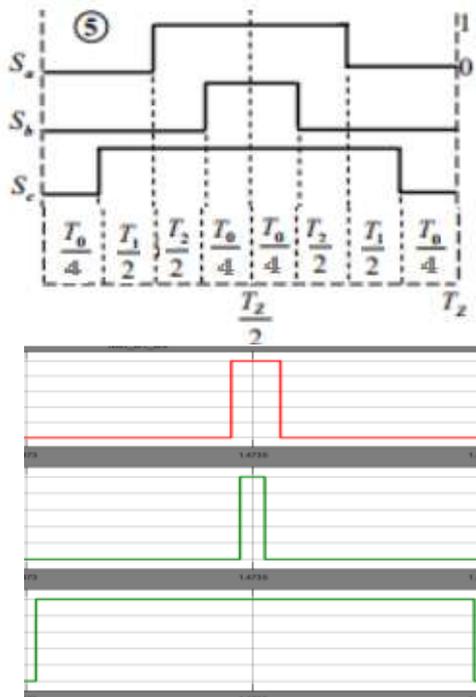


Figure 4.29 : Le cinquième secteur

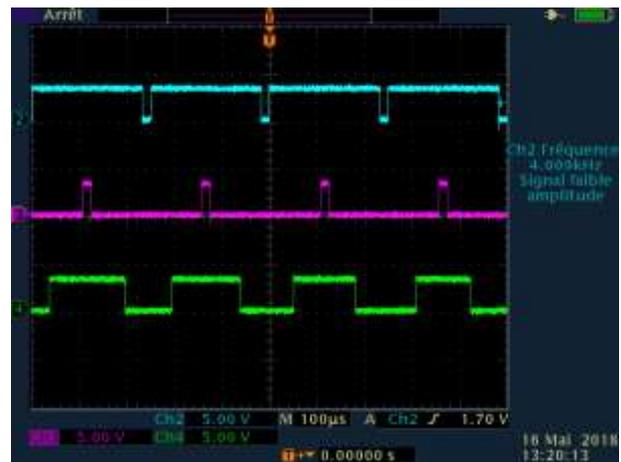
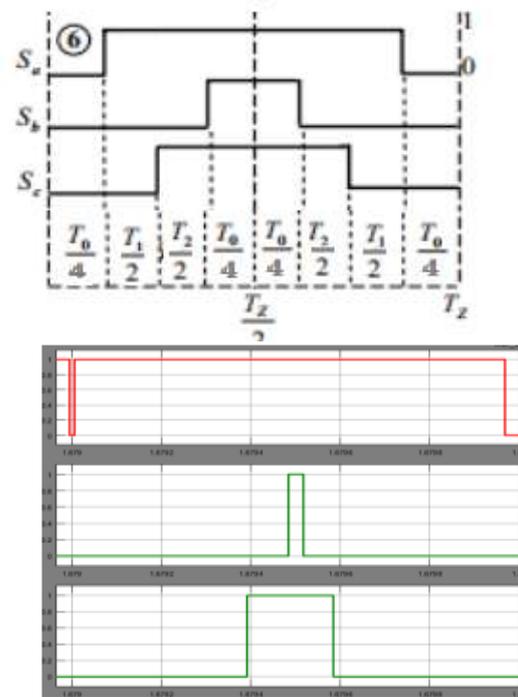


Figure 4.30 : Le sixième secteur

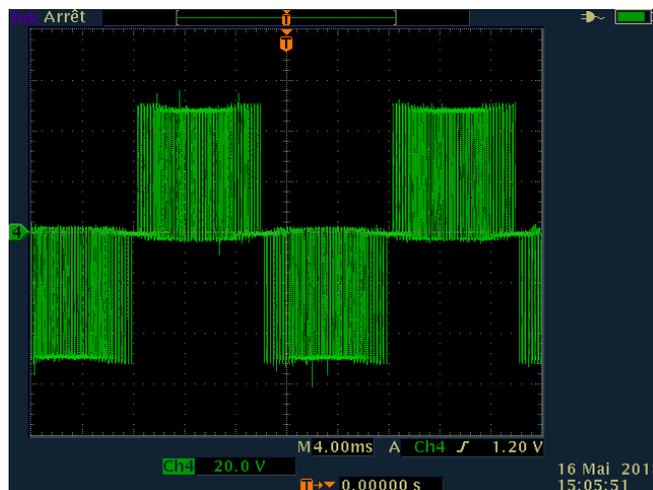


Figure 4.31 : Tension composée V_{12} .

On remarque que la tension simple V_{1n} prend cinq valeurs tension : $(+ V_{dc})$ et $(- V_{dc})$.



Figure 4.32 : La tension simple V_{1n} .

On remarque que la tension simple V_{1n} prend cinq valeurs tension :

$$\left(\left(-\frac{2V_{dc}}{3}\right), \left(\frac{2V_{dc}}{3}\right), \left(-\frac{V_{dc}}{3}\right), \left(\frac{V_{dc}}{3}\right), 0\right).$$

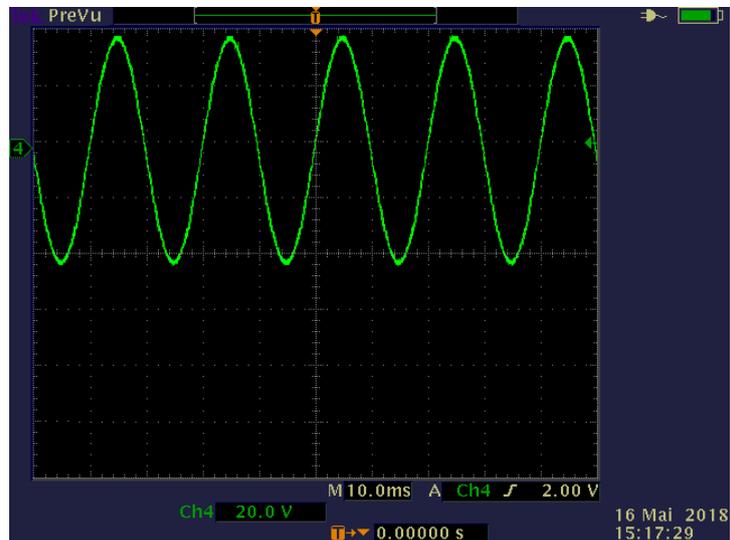


Figure 4.33 : La tension composée après filtrage.

L'utilisation de filtre LC nous a permis de réduire les harmoniques et d'avoir une forme sinusoïdale du signal de sortie.

4.7. Le hacheur Buck-boost :

Ce convertisseur DC/DC sera utilisé pour l'implémentation de la commande PI. C'est un hacheur réversible à module IGBT. Il est composé de deux interrupteurs, (deux transistors) et sont les mêmes utilisées dans le hacheur survolteur quand décrit précédemment. Et de même, nous avons utilisé un refroidisseur, en fixant les deux interrupteurs sur ce refroidisseur.

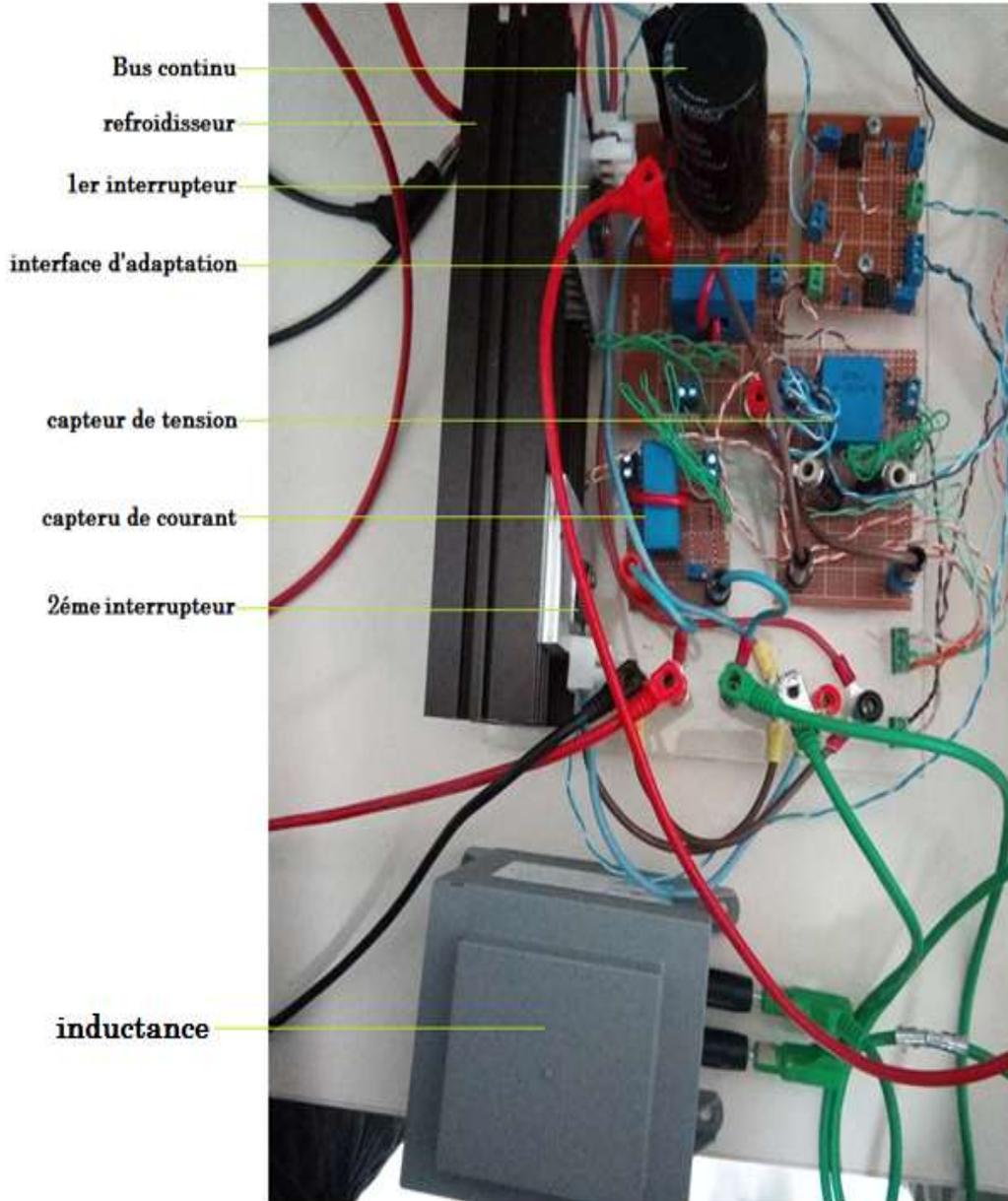


Figure 4.34 : Le hacheur survolteur-dévolteur.

4.7.1. Bus continu : la capacité du bus continu est de 1000 μF et supporte une tension de 450V.

4.7.2. Circuit de commande :

L'interface d'adaptation contient deux HCPL 3101, chacun a sa propre alimentation (sinon il y aura un court-circuit du premier IGBT) parce qu'on deux signaux de commandes. Un capteur de tension pour récupérer la tension du bus continu, et deux capteurs de courant,

un pour mesurer le courant de la batterie et l'autre pour mesurer le courant de sortie du hacheur, et sont de même type que les capteurs du hacheur boost.

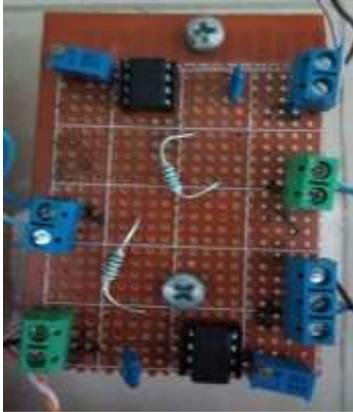


Figure 4.35 : Circuit de commande du hacheur Buck-boost



Le Bus continu et le capteur de la sortie

4.8. Les batteries : 4 batteries chacun a une tension de 12V et 9Ah connectés en série donc la tension sera 48V et la capacité 36Ah.



Figure 4.38 : Les 4 batteries 12V/9Ah

4.9. Résultats expérimentaux :

Afin de tester cet étage d'adaptation, nous avons alimenté l'un des optocoupleur par la pile et l'autre par une alimentation stabilisée, et en générant 2 signaux complémentaires à partir de Arduino Due, on a obtenu comme résultats :

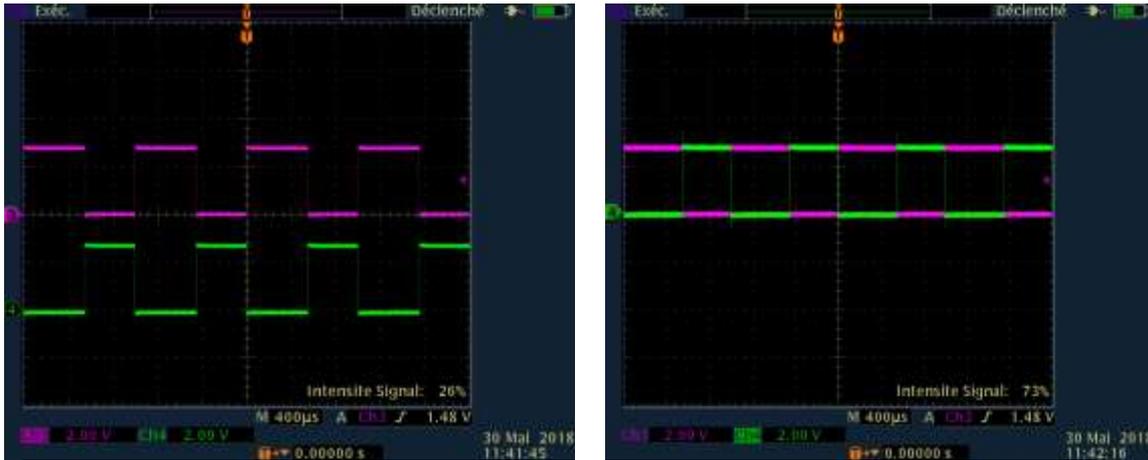


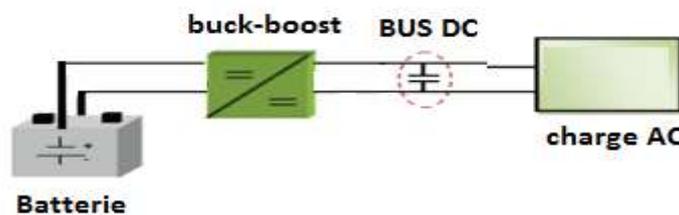
Figure 4.39 : Les signaux de commandes

Le temps mort (pour éviter le court-circuit du bus continu, où les deux interrupteurs sont fermés) est de $2\mu\text{s}$:



Figure 4.40 : Visualisation du temps mort.

Afin de tester le bon fonctionnement du hacheur buck boost on a fait le montage ci-dessous :



En attaquant les IGBT par un signal de rapport cyclique $\alpha=0.6$, théoriquement avec ce α la tension de sortie sera trois-demi de la tension de l'entrée $V_e = \frac{\alpha}{1-\alpha} V_s$ avec $V_e=30\text{V}$ (par l'alimentation stabilisé), et ça ce que nous avons obtenu comme résultat $V_s=45\text{V}$:

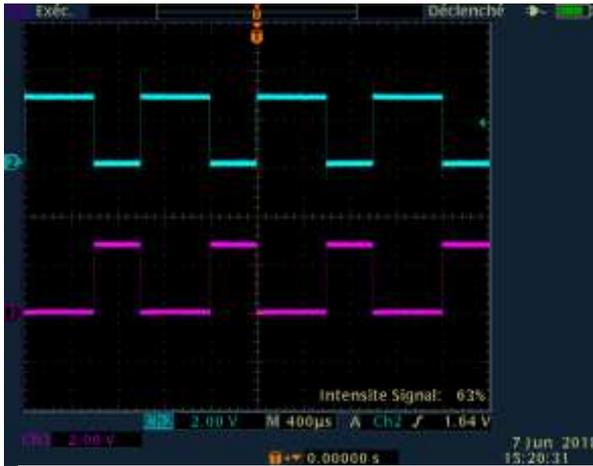


Figure 4.41 : Signaux des commandes complémentaires

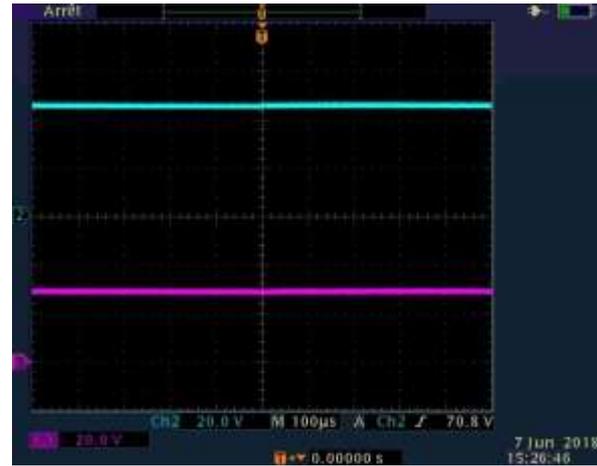


Figure 4.42 : Signal d'entrée et de sortie du hacheur

4.10. Implémentation du régulateur PI :

Théoriquement le régulateur fonctionne en temps réel, mais numériquement, il fonctionne en temps discret, donc on a besoin de tirer l'expression du régulateur PI échantillonné. Dans le domaine temporel, la commande $u(t)$ par rapport à l'erreur $e(t)$ est donnée comme suit :

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (1)$$

Pour obtenir la forme discrète, le terme intégral peut être approximé en utilisant l'expression suivante:

$$\int_0^t e(t) dt \approx T \cdot \sum_{k=0}^n e(k) \quad (2)$$

Où $t = n.T$, n : est l'étape discrète à l'instant t

T est la période d'échantillonnage.

L'expression discrète du régulateur PI peut donc être donnée comme suit :

$$u(n) = K_p e(n) + K_i \sum_{k=0}^n e(k) \quad (3)$$

On utilise les pins digitaux 45 et 7 de la carte Arduino Due qui sont connectés aux chaînes PWMH6 et PWML6 respectivement, pour générer les signaux de commande du hacheur Buck-boost réversible en courant. Les impulsions des interrupteurs sont symétriques par rapport à la demi période d'échantillonnage et ils passent du niveau haut au niveau bas, donc on configure la chaîne de modulation à largeur d'impulsion (MLI) en mode alignement centré (PWM_CMRx(CPOL=1)) c'est-à-dire que le signal de sortie est au niveau haut au début de la période, et passe au niveau bas lorsque la valeur du registre de compteur (PWM_CCNTx) devient supérieure à la valeur du registre (PWM_CDTYx).

En tenant compte de la fréquence d'horloge de la carte Arduino Due est de 84 MHz, et la chaîne est configurée en alignement centré on peut calculer la fréquence d'échantillonnage de 1kHz par la relation (1.1) et on charge le registre PWM_CPRD6 par la valeur :

$$\text{PWM_CPRD6} = \frac{84 \cdot 10^6}{2 \cdot 1 \cdot 10^3} = 42000$$

Sous-programme d'interruption :

On active la génération automatique de l'interruption à chaque début de période pour mettre à jour le rapport cyclique. Dans cette fonction, on va :

- ✓ Mesurer la tension du bus continu V_{dc} , le courant de batterie I_{Lb} , et le courant de charge I_s illustrées dans la figure (1.1).
- ✓ Calculer les régulateurs proportionnelle et intégrateur en utilisant l'équation (3).
- ✓ Calculer le nouveau rapport cyclique pour la chaîne PWM6 en incrémente ou en décrémente le rapport cyclique en fonction de l'erreur entre la tension de référence et la tension mesurée.
- ✓ Charger le registre tampon PWM_CDTYUPD6 pour actualiser le rapport cyclique au début du prochaine période d'échantillonnage. Cette méthode a pour but d'avoir une durée d'impulsion précise, et ne dépend pas par le temps d'exécution du programme.

La structure du programme est comme suit :

Void setup()

Initialisation de la sortie PWMH6

Initialisation de la chaîne PWMH6 (période, alignement centré et polarité)

Génération de l'interruption à chaque début de période.

Void interrupt()

Void loop()

Mesure de la tension V_{dc} , les courants I_{Lbat} , et I_s .

Calcule des régulateurs proportionnelle et intégrateur

Actualisation du rapport cyclique de la chaîne PWMH6 en fonction de la somme des régulateurs.

Remarque :

On a pas réussi à valider le résultat du régulateur PI, à cause des problèmes de matériels.

Conclusion :

Les résultats obtenus en simulation et en réalisation sont les mêmes dans la limite des erreurs expérimentales et le matériel disponible pour la réalisation, vu que les composants en simulation sont idéal.

Nous avons implémenter les algorithmes de l'MPPT, de la régulation PI et de la modulation vectorielle à deux niveaux avec succès, tout en optimisant les ressources matérielles utilisées (circuit de commande) et nous avons assuré la réduction des harmoniques, en plus de la réduction des pertes de commutation des interrupteurs par la minimisation du nombre de commutations de ces derniers dans le cas de la commande SVPWM par la génération des impulsions symétriques.

Donc finalement on a validé les résultats théoriques et de simulation montrés dans le chapitre précédent.

Conclusion générale

Notre tâche dans ce mémoire était de réaliser et appliquer des lois de commandes sur des convertisseurs de puissance, et faire une application à un système photovoltaïque, nous allons faire un bilan des résultats de notre travail.

Dans un premier lieu, nous avons exposé un état de l'art sur les énergies en générale, et sur les énergies renouvelables en particulier, en jetant la lumière sur l'énergie solaire, nous avons donc dans un premier chapitre exposé, des généralités sur les systèmes solaires photovoltaïques, et nous avons expliqué le principe de conversion d'énergie solaire (l'effet photovoltaïque) et la construction des cellules et leurs différentes générations puis on a parlé brièvement sur les systèmes PV et les différentes applications concernées, et à partir de ça nous avons choisi le système autonome pour notre application.

Par la suite, nous avons présenté le système qu'on a choisi pour notre application où on a modélisé les éléments de la chaîne PV étudié, et bien sûr dimensionner les organes afin de pouvoir réaliser le système et le faire fonctionner correctement.

Dans la troisième partie, nous avons étudié et appliqué les différents algorithmes et lois de commande, en commençant par les algorithmes de maximation de la puissance, passant par les régulateurs, en terminant par les commandes de l'onduleur, tout en simulant le système sous Matlab/Simulink. Nous avons obtenu des bons résultats de régulation, où on a choisi la technique P&O (la technique la plus simple), puis on a intégré le système de stockage, en régulant la tension du bus continu et le courant de batterie.

Et on a vu que le meilleur des régulateurs est le régulateur par mode de glissement mais il force le système à fonctionner en maximum de puissance (une grande appelle de courant), ce qu'il peut provoquer une défaillance au niveau de l'un des composant de circuit de puissance, donc on a préféré de prendre le régulateur PI. Pour l'onduleur, nous avons appliqué différents techniques de commande (MLI sinusoïdale, injection de la troisième harmonique et la commande SVM), en faisant une petite comparaison entre les résultats des techniques utilisées.

Par la suite, nous avons passée à développer une technique de gestion d'énergie, en proposant une technique de limitation de la puissance PV en cas d'excès d'énergie, et on a réussi à valider et intégrer cette algorithmes au système, cette dernière sert à satisfaire la demande dans les temps critique de surcharge, elle protège la batterie (assure une durée de vie plus grande), de plus, elle donne à la chaîne photovoltaïque une continuité de service pendant la nuit.

Le dernier chapitre constitue la contribution principale de ce mémoire, réalisation d'un banc expérimental constitué d'un émulateur PV, hacheur boost, hacheur Buck-boost, onduleur commandé par SVM. La commande des différents convertisseurs est réalisée à base de microcontrôleur. Les résultats obtenus sont satisfaisants.

Comme perspective, On propose les idées suivantes :

Régulateur du bus continu avec des algorithmes avancés.

Implémentation d'autres algorithmes MPPT.

Bibliographie

- [1] <https://www.landes.fr/files/cg40/environnement/Guide-PV.pdf> « L'énergie solaire photovoltaïque usage raccordé au réseau ».
- [2] https://sitelec.org/download.php?filename=cours/solaire_photovoltaïque.pdf «Notions de base sur l'énergie solaire photovoltaïque »
- [3] B. Flèche - D.Delagnes « Energie solaire photovoltaïque » juin 07
- [4] vincent.boitier.free.fr/L1/TD/Energie_solaire_photovoltaïque.pdf « Production d'énergie électrique ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE »
- [5] Muhammad Usman Iftikhar. "Contribution à la modélisation des convertisseurs continu/continu dans une perspective de commande, Influence du filtre d'entrée". Electric power. Université Paris Sud - Paris XI, French, 2008
- [6] J.C.Salmon, S.Olsen, and N.Durdle, « A three - phase ML1 Strategy using A stepped reference Waveform ») IEEE Transactions on Industry Vol. IA.27, NOS, 1991,pp.914-920.
- [7] M.A.Boost and P.D Ziogas, «(State-of - the art carrier ML1 technique : a critiquevaluation D.IEEE Transactions on industrie Applications, Vol.IA.24,N02, 1988, pp.271-279.
- [8] G. A. Raducu, "Control of Grid Side Inverter in a B2B Configuration for WT Application", Master, Aalborg University, 2008.
- [9] P. Antoniewicz, "Predictive Control of Three Phase AC/DC Converters", Thèse de Master, Université de Warsaw, 2009.
- [11] H.CHEKIREB, “ La conversion continue-alternative“, Cour d'électronique de puissance, Ecole nationale polytechnique, Alger, Algérie 2016
- [12] G. Tsengenes, et G. Adamidis, "A multi-function grid connected PV system with three level NPC inverter and voltage oriented control", Elsevier Solar Energy, 2011.
- [13] G. A. Raducu, "Control of Grid Side Inverter in a B2B Configuration for WT Application", Master, Aalborg University, 2008.
- [14] W. Omran, "Performance Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Systems", Thèse de Doctorat, Université de Waterloo, Ontario, Canada, 2010.
- [15] M. Amin, "Efficiency and Power Density Improvement of Grid-Connected Hybrid Renewable Energy Systems utilizing High Frequency-Based Power Converters", Doctorat, Université Internationale de Florida, 2012.
- [16] D. Séra, "Real-time Modelling, Diagnostics and Optimised MPPT for Residential PV systems", Thèse de Doctorat, Université Aalborg, Denmark , 2009.
- [17] A. BOUHARCHOUCHE, "Etude Et Commande D'un Systeme De Production Hybride Eolien photovoltaïque ", Thèse de Magistère, EMP Alger, 2013.

- [18] D. Séra, "Real-time Modelling, Diagnostics and Optimised MPPT for Residential PV systems", Thèse de Doctorat, Université Aalborg, Denmark, 2009.
- [19] D. Rachedi Nedjmi. "Commande hybride avec observation d'un UAV de type quadrotor". Thèse de Magistère, Ecole Militaire Polytechnique, Alger, Algérie, 2010
- [20] Nordine Maherzi, "Etude, conception et réalisation d'un convertisseur d'énergie DC/DC associé à des super condensateurs ", Thèse de diplôme d'ingénieur CNAM, LYON 2010.
- [21] Z. KHERROUBI, "implémentatin de la SVM à deux niveaux et à trois niveaux par la carte Arduino Due", Thèse d'ingénieur ,ENP Alger, 2015.
- [22] M.T. ACHOUR, "ÉTUDE ET COMMANDE D'UN ONDULEUR TRIPHASÉ À STRUCTURE Z-SOURCE :APPLICATION AUX SYSTÈMES MULTI-SOURCES .Thèse d'ingénieur,EMP Alger, 2016.
- [23] Y.DJADI et B.BABAAISSA, "simulation et réalisation d'un MPPT appliqué à un système de pompage photovoltaïque", Thèse d'ingénieur ,ENP Alger, 2012.
- [24] M.OMAR, "Conception et réalisation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleur gestion énergétique" Mémoire magistère, Université de Tlemcen 2011.
- [26] François Bernaut, « Modulations MLI et MPI », Techniques de l'ingénieur, Traité d'électronique, E3967, Mars 2003.
- [27] A. DAVIGNY, « Participation aux services système Défermes d'éoliennes à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de Doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 11 décembre 2007.
- [28]] R. SALAH EDDINE, "COMMANDE DE MACHINE ELECTRIQUE EN ENVIRONNEMENT" Mémoire magistère, Université de Constantine 2009.
- [30] P.Bauer .S.W.H.DeHaan,C.R. Meyl. JTG.Pierik. "Evaluation of Electrical systems for offshore Windfarms " .CDROM. OF THE IEEE IAS Conf .oct.2000.
- [31] Systèmes photovoltaïques. Alain Ricaud, Oct 2011-Systèmes PV_Polytech_Alain Ricaud_Oct-11.doc
- [29] <http://homerenergy.com>.
- [32] www.arduino.com
- [33] www.SEMIKRON.com

Annexe A

Le tableau suivant représente les différents interrupteurs et leurs caractéristiques afin de bien choisir l'interrupteur qui convient à notre carte de puissance :

Composants/ Caractéristiques	BJT	MOSFET	GTO	IGBT
Gamme de Puissance Apparente (KW)	10 à 10 ³	10 à 10 ²	10 ⁴ à 10 ⁸	10 à 10 ³
Pertes en conduction	Faible	Elevée	Faible	Moyenne
Pertes en commutation	Elevée	Faible	Elevée	Moyenne

Le choix de l'interrupteur

Quelques détails sur le logiciel PPPE :

Ensemble de fonctionnalités avancées

Magna-Power Electronics a travaillé en étroite collaboration avec les fabricants d'onduleurs solaires pour affiner le jeu de fonctions PPPE. Certaines des fonctionnalités clés avancées de PPPE sont les suivantes:

Modélisation EN50530

La norme européenne EN50530 fournit un nouvel algorithme pour la modélisation correcte des panneaux solaires. PPPE 2.0 incorpore ce modèle, permettant en outre la sélection de paramètres de film mince ou de silicium polycristallin. Définir une courbe est aussi simple que de spécifier la tension à vide, le courant de court-circuit et le point de puissance maximum désirés. Vous pouvez également entrer des paramètres manuels pour une modélisation plus personnalisée ou l'importation de profils à partir d'un fichier externe.

Live View Viewer

Une nouvelle visionneuse de sortie en direct fournit six graphiques de paramètres de sortie instantanés en fonction du temps. Ces données permettent à l'utilisateur de visualiser les fluctuations de tension, de courant et de puissance dans le temps.

Interpolation de courbe

Une fonction d'interpolation a été ajoutée pour générer automatiquement des courbes de transition. Cette fonctionnalité permet des transitions fluides d'une courbe à l'autre sur une période définie par l'utilisateur.

Annexe B : [Homer]

Homer est un logiciel de dimensionnement des systèmes énergétiques hybrides, Ce logiciel est considéré comme l'un des plus performants dans le domaine du dimensionnement à l'échelle mondiale.

Le logiciel de modélisation de l'énergie HOMER est un outil puissant pour la conception et l'analyse des systèmes d'alimentation hybrides, qui contiennent un mélange de générateurs conventionnels, la cogénération, les éoliennes, le photovoltaïque solaire, l'hydroélectricité, les batteries, les piles à combustible, l'énergie hydraulique, la biomasse et d'autres intrants. Pour une ou plusieurs installation connectées au réseau ou autonome (comme notre cas), HOMER permet de déterminer comment les ressources variables, comme le vent et l'énergie solaire peut être intégrée de façon optimale dans les systèmes hybrides. Les ingénieurs emploient HOMER pour courir des simulations de différents systèmes énergétiques, comparent les résultats et obtiennent une projection réaliste de leur capital et dépenses de fonctionnement d'exploitation. HOMER détermine les possibilités économiques d'un système énergétique hybride, optimise la conception de système et permet à des utilisateurs de comprendre vraiment comment les systèmes renouvelables hybrides fonctionnent [17] [29].

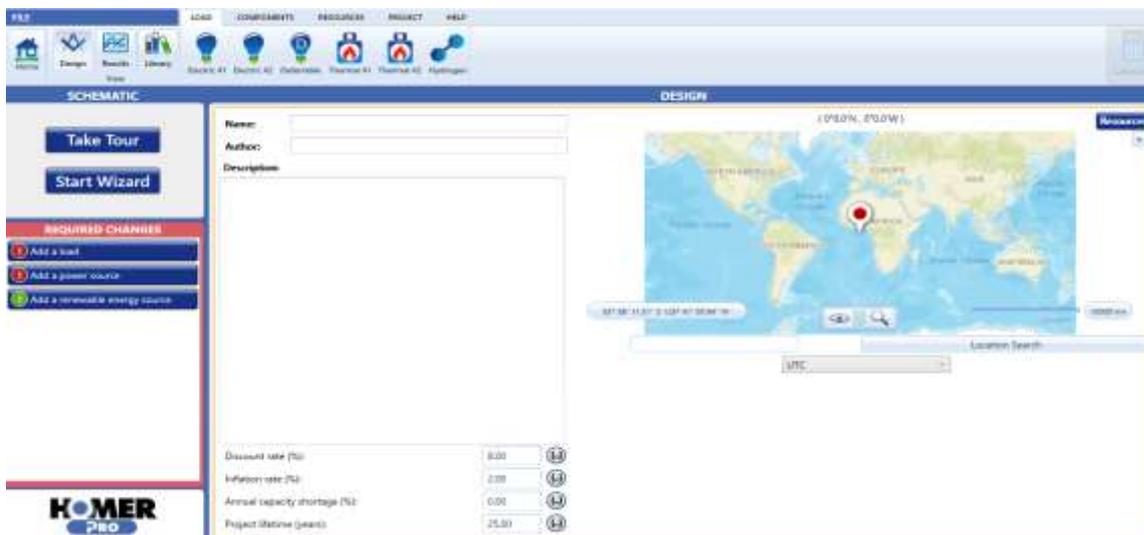


Figure : le logiciel Homer.



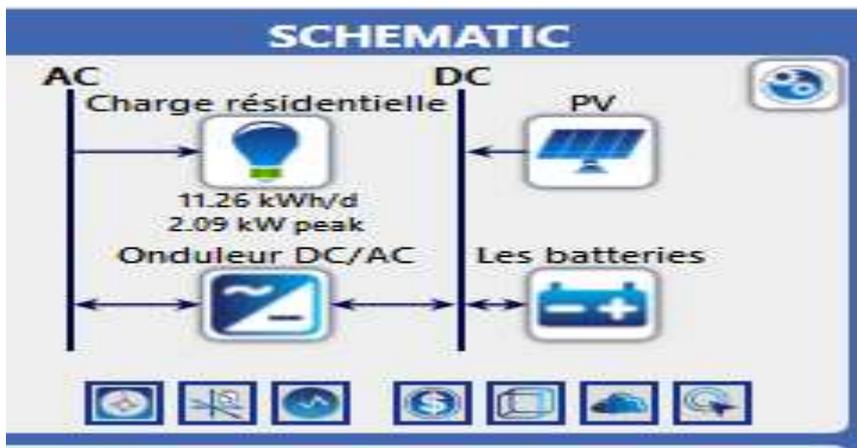
Figure : les différents composants dans le logiciel Homer



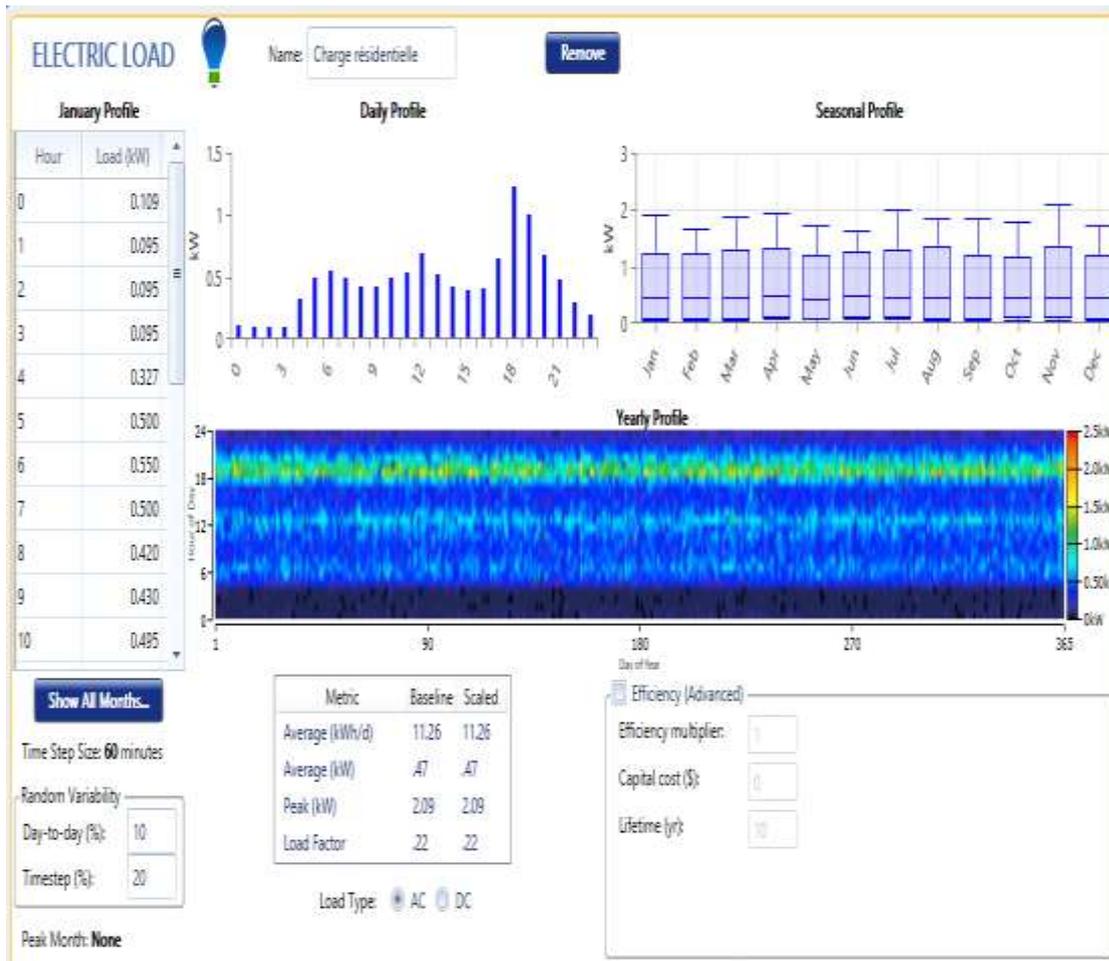
Figure : les différentes sources dans le logiciel Home

Exemple d'application :

La configuration de l'installation à dimensionner est la suivante :



Le profil de la charge journalière introduit dans HOMER qui correspond à une consommation journalière d'une charge résidentielle :



La batterie choisie dans ce dimensionnement a pour tension nominale 12V, sa capacité nominale : 201 Ah et d'autres caractéristiques sont représentés à la figure suivante :

STORAGE Name: Les batteries Abbreviation: Les batt

Properties
Kinetic Battery Model
 Nominal Voltage (V): 12
 Nominal Capacity (kWh): 2.42
 Maximum Capacity (Ah): 201
 Capacity Ratio: 0.375
 Rate Constant (1/hr): 1.06
 Roundtrip efficiency (%): 90
 Maximum Charge Current (A): 33.4
 Maximum Discharge Current (A): 361
 Maximum Charge Rate (A/Ah): 1
<http://www.bae-berlin.de/>
 BAE Secura PVV BLOCK Solar batteries are the ideal solution for storage of regenerative energy in home systems and in the industrial sectors. Robustness and reliability are characteristic for BAE Secura PVV BLOCK Solar batteries. Moreover, they do not require any refilling of water during the whole battery life time and are maintenance-free. The additional option for operation of the batteries in horizontal position allows compact

Batteries

Quantity	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	500.00	500.00	0.00

Lifetime:

throughput (kWh): 2,112.40

time (years): 18.00

Quantity Optimization
 HOMER Optimizer™
 Search Space

#

0
2
4
6
8
10
12
14
15
18
20

Site Specific Input

String Size: 1 Voltage: 12 V

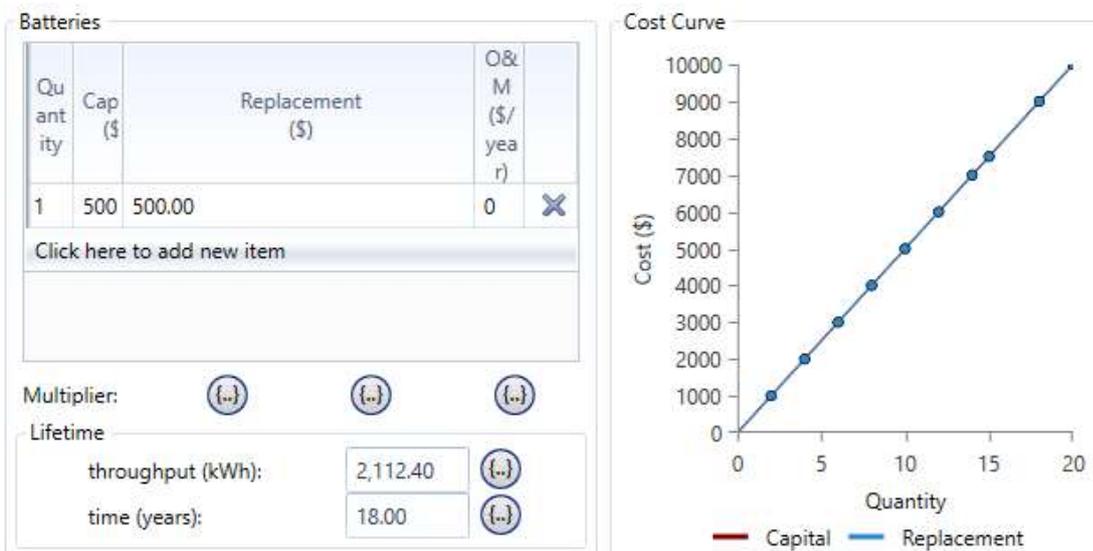
Initial State of Charge (%): 100.00

Minimum State of Charge (%): 20.00

5.00 Maintenance Schedule...

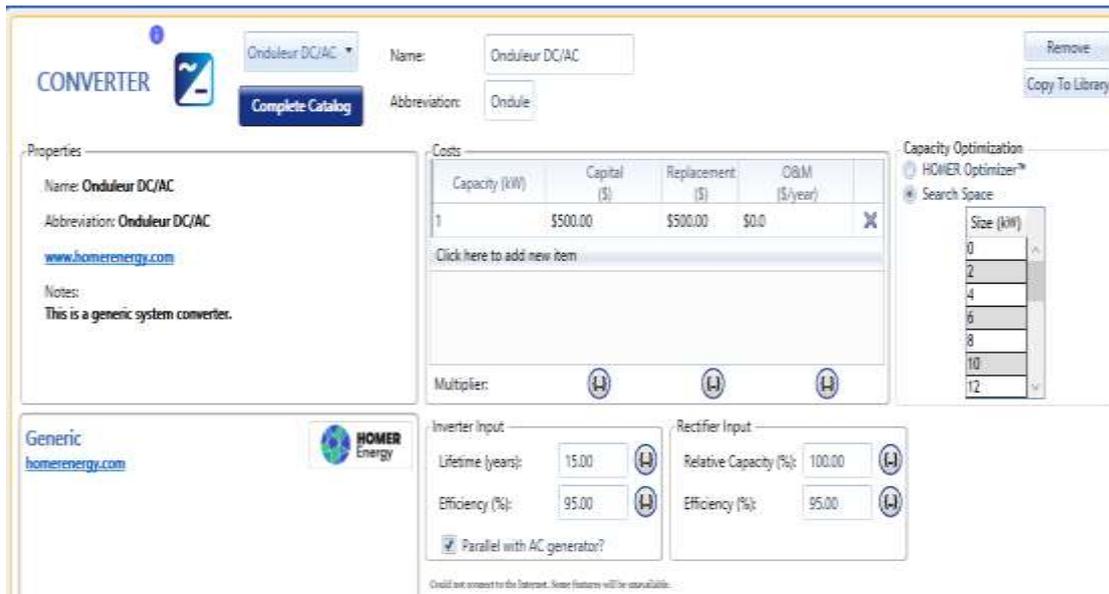
BAE Batterien GmbH

Les prix des batteries ainsi que les plages de variation de nombre des batteries qui sont préalablement calculées selon le nombre de jours d'autonomies choisis sont représentés comme suit :

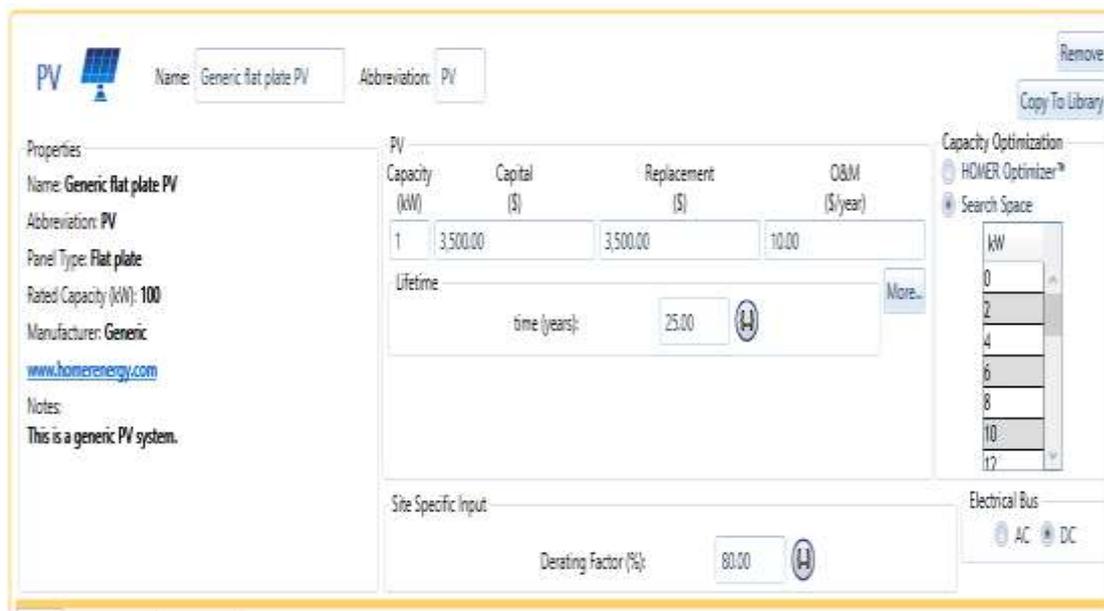


Pour les prix des onduleurs nous avons pris les chiffres de l'internet.

Les données concerne l'onduleur choisis sont représentés à la figure suivante :



Pour les panneaux photovoltaïques, il faut indiquer le prix d'une certaine puissance, pour qu'il puisse évaluer le cout unitaire, et indiquer ainsi les pas possible voulu ; les données et d'autres paramètres à introduire sont représentés à la figure suivante :



Les données d'ensoleillement peuvent être introduites de trois façons différentes :

1- saisir à la main pour chaque mois.

2- importer des données d'après un fichier.

3- charger via l'internet, et pour cette dernière possibilité il faut juste indiquer l'emplacement de l'endroit de l'installation en indiquant son Latitude et son Longitude : nous avons choisir notre école (ENP) pour prendre ces données.

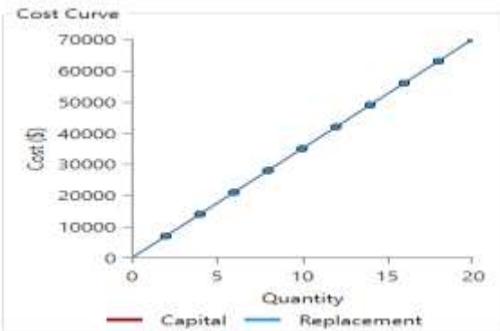
PV

Capacity (kW)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	3500.00	3500.00	10

Click here to add new item

Multiplier: (-) (-) (-)

Lifetime time (years): 25.00 (-)



Rue des Frères OUDEK, El-Harrach, Algeria (36°43.4'N , 3°9.0'E)

Resources

61° 26' 31.66" N 82° 47' 34.69" W

Location Search

(UTC+01:00) Afrique centrale - C

SOLAR GHI RESOURCE  Remove

Choose Data Source: Enter monthly averages Import from a time series data file or the library

Download From Internet... Import... Import and Edit... Library: -

Monthly Average Solar Global Horizontal Irradiance (GHI) Data

Month	Clearness Index	Daily Radiation (kWh/m ² /day)
January	0.517	2.480
February	0.550	3.380
March	0.572	4.590
April	0.578	5.690
May	0.586	6.490
June	0.623	7.200
July	0.631	7.130
August	0.627	6.440
September	0.612	5.280
October	0.571	3.820
November	0.517	2.630
December	0.491	2.150

Downloaded at 6/4/2018 9:38:51 PM from:
 NASA Surface meteorology and Solar Energy database.
 Global horizontal radiation, monthly averaged values over 22 year period (July 1983 - June 2005).
 CellNumber: 126183
 CellDimensions: 1 degree x 1 degree
 CellMidpointLatitude: 36.5
 CellMidpointLongitude: 3.5

Annual Average (kWh/m²/day): 4.77

Une fois que nous avons tous introduits, nous pouvons maintenant passer au dimensionnement en cliquant sur le bouton « Calculate », les résultats possible trouvés d'après HOMER apparaissent :

Architecture									
				PV (kW) ▼	Les batteries ▼	Onduleur DC/AC (kW) ▼	Dispatch ▼	COE (\$) ⓘ ▼	NPC (\$) ⓘ ▼
				6.00	18	2.00	LF	\$0.654	\$34,728

Cost		System		PV		
Operating cost (\$/yr) ⓘ ▼	Initial capital (\$) ▼	Ren %ac (%) ⓘ ▼	Total Fuel (L/yr) ▼	Capital Cost (\$) ▼	Production (kWh/yr) ▼	Autonomy (hr) ▼
\$288.34	\$31,000	100	0	21,000	9,412	74.2

Le résultat est comme suit:

- 6kW de puissance nominale pour les panneaux photovoltaïque (Donc 24 panneaux de type : SW250 POLY).
- 18 Batteries de stockage de 2,42 kWh (12V*201Ah).
- 2 kW de puissance nominale pour l'onduleur.

Annexe C [Arduino]

Arduino est un projet en source ouverte (open source), c'est une plate-forme de prototypage d'objets interactifs à usage créatif constituée d'une carte électronique et d'un environnement de programmation Arduino IDE (integrated development environment) basée sur le langage C++. Cet environnement matériel et logiciel permet à l'utilisateur de formuler ses projets par l'expérimentation directe avec l'aide de nombreuses ressources disponibles en ligne. Le matériel consiste d'un circuit réalisé autour d'un microcontrôleur Atmel AVR. Pont tendu entre le monde réel et le monde numérique, Arduino permet d'étendre les capacités de relations humain/machine ou environnement/machine.

A screenshot of the Arduino IDE interface. The title bar reads "ReadAnalogVoltage | Arduino 1.6.5". The menu bar includes "File", "Edit", "Sketch", "Tools", and "Help". The main editor window shows the following C++ code:

```
// the setup routine runs once when you press reset:
void setup() {
  // initialize serial communication at 9600 bits per second:
  Serial.begin(9600);
}

// the loop routine runs over and over again forever:
void loop() {
  // read the input on analog pin 0:
  int sensorValue = analogRead(A0);
  // Convert the analog reading (which goes from 0 - 1023) to a voltage (0 - 5V):
  float voltage = sensorValue * (5.0 / 1023.0);
  // print out the value you read:
  Serial.println(voltage);
}
```

The bottom status bar displays memory usage information: "Sketch uses 3012 bytes (9%) of program storage space. Maximum is 32256 bytes. Global variables use 200 bytes (9%) of dynamic memory, leaving 1848 bytes for local variables. Maximum is 2048 bytes."

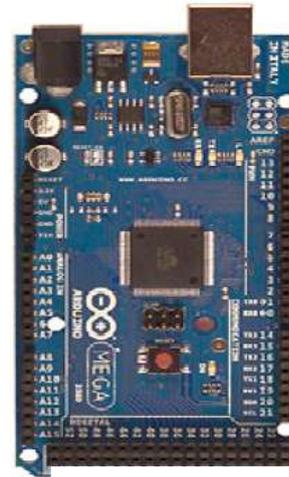
L'environnement de développement Intégré



Milanov



UNO

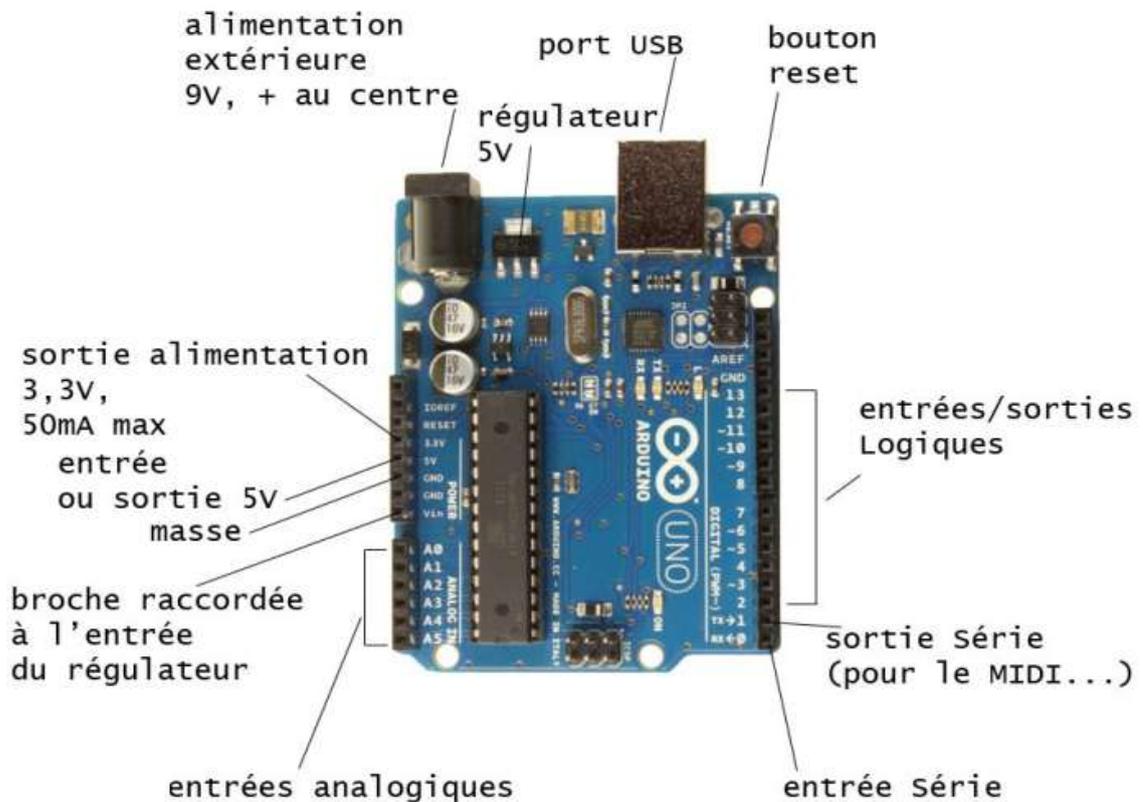


Mega

Quelques cartes Arduino

La tâche d'un Arduino

Le microcontrôleur peut être programmé pour analyser et produire des signaux électriques à travers des signaux, de manière à effectuer des tâches très diverses comme le pilotage d'une machine. Il exécute un programme ce programme est contenu dans une de ses mémoires, qui peut être de la mémoire morte ou ROM, c'est-à-dire de la mémoire programmée une fois pour toutes par le fabricant du circuit, ou de la mémoire flash, c'est-à-dire de la mémoire que l'utilisateur peut programmer et effacer tout à loisir.



Type de carte Arduino :

Il y a trois types de cartes :

- Les dites « officielles » qui sont fabriquées en Italie par le fabricant officiel : Smart Projects.
- Les dites « compatibles » qui ne sont pas fabriquées par Smart Projects, mais qui sont totalement compatibles avec les Arduino officielles.
- Les « autres » fabriquées par diverse entreprise et commercialisées sous un nom différent (Freeduino, Seeduino, Femtodui no, ...).

Il existe beaucoup de carte Arduino, Les plus utilisées sont Arduino Uno, Mega, 2560, Duemilanov, et Arduino Due.

Arduino Due :

La carte Arduino Due est construite autour du microcontrôleur Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3 CPU, C'est la première carte Arduino construite autour d'un microcontrôleur 32-bit de Core ARM. Elle fonctionne avec une horloge de 84 MHz. elle dispose de 54 broches numériques d'entrée/ sortie, dont 12 peuvent être utilisées comme sortie de modulation a largeur d'impulsion PWM avec une résolution de 8 bit, 12 entrées analogiques, 4 ports de communication série (UART), 2 modules de communication TWI, 2 convertisseur analogique numérique et une interface de communication USB[].



Arduino Due

Spécification techniques de la carte :

- Microcontrôleur : AT91SAM3X8E.
- Fréquence d'horloge : 84 MHz.
- Tension de fonctionnement : 3.3 V.
- Gamme de tension d'entrée (recommandé) : 7-12v
- Gamme de tension d'entrée (Limite) : 6-20 V.
- Pins digitaux d'entrées/sorties : 54.
- Pins digitaux d'entrées/sorties PWM : 12.
- Pins de sortie analogique (CAN) : 2.
- Courant direct par pin digital : 130 mA.
- Mémoire flash : 512 KB.
- Mémoire SRAM : 96 KB.
- Ports de communication série (UART) : 4.
- Nombre des Temporisateurs / compteurs : 9.
- Module CAN : 2.
- Module TWI : 2.
- Module SPI : 6.
- ETHERNET : 1.
- Longueur : 101.52 mm.
- Largeur : 53.3 mm.
- Poids : 36 g.

L'environnement de programmation Arduino (Arduino IDE) :

C'est une application écrite en Java inspirée du langage Processing, l'Arduino donc se programme en un langage qui est un mélange de C et de C++ restreint et adapté aux possibilités de la carte. Il comporte :

- Un éditeur de texte permettant d'écrire le programme source en langage évolué
- Un compilateur permettant de traduire ce programme source en programme objet ou en code binaire prêt à être placée en mémoire de l'Arduino
- Un programmeur assurant la programmation de la mémoire de l'Arduino au travers du port USB dont il est équipé.

La partie principale de la fenêtre de l'environnement de développement est occupée par la zone d'édition de programme, tandis que le haut de cette fenêtre comporte une barre de boutons permettant l'accès aux principales fonctions de l'environnement.

Botton

Fonction



Vérifier : compile le sketch (programme) en cours d'édition et, de ce fait vérifie sa syntaxe.



Nouveau : ouvre une fenêtre vierge pour écrire un nouveau sketch (programme).



Ouvrir : ouvre la liste de tous les sketches contenus dans notre sketch book. Le fait de cliquer sur un d'entre eux l'ouvre dans la fenêtre d'édition courante.



Enregistrer : sauvegarder le sketch en cours d'édition.



Téléverser : compile le programme en cours d'édition et le télécharge en mémoire de l'Arduino.



Moniteur série : ouvre l'écran du moniteur de porte série intégré à l'environnement.

En partie basse, on trouve une zone sur fond noir dans laquelle s'affichent les messages de service propres à certaines commandes, lors de du téléchargement du programme en mémoire de l'Arduino par exemple, ou bien encore différents messages d'erreur de compilation.



- 1- Barre des listes.
- 2- Barre des commandes rapide.
- 3- la zone d'édition de programme
- 4- zone d'affichage (les erreurs de compilation ...)

L'éditeur proposé est classique et supporte, via le menu Edition, les commandes habituelles que sont couper, copier et coller ainsi qu'un certain nombre de fonctions plus spécifiques à l'écriture de programmes.

Contenu d'un sketch :

Sketch est le programme destiné à l'Arduino, il comporte deux fonctions distinctes. La première, appelée « setup », n'est exécuté qu'une seule fois juste après le lancement du programme elle contient généralement des instructions d'initialisation de certaines ressources de la carte telle que, définition des lignes des portes parallèles qui sont en entrées ou en sorties, définition de la vitesse de fonctionnement du port série, etc. Elle s'écrit de la façon suivante :

```
Void setup ()  
{  
Instruction à n'exécuter qu'une  
seule fois ;  
}
```

La seconde fonction s'appelle « loop » (boucle en anglais) et contient les instructions qui seront indéfiniment répétées tant que l'Arduino restera sous tension. L'Arduino exécute une seul fois les instructions contenues dans la fonction setup puis exécute ensuite indéfiniment les instructions contenues dans la fonction « loop » de ce même programme.

La fonction « loop » s'écrit de la façon suivante :

```
Void loop ()  
{  
Instructions qui seront répétées  
indéfiniment ;  
}
```

Selon le cas, une troisième partie peut ou non être présente mais ne contient pas d'instructions exécutables. Il s'agit de la zone de définition de constantes au moyen de « define » ou « const », ou bien encore d'inclusion de bibliothèques utilisées par le programme au moyen de « include ». Elle se place avant la fonction setup. La structure générale d'un programme destiné à l'Arduino est ainsi la suivante :

Définition éventuelle des constantes et bibliothèques.

```

Void setup ()
{
Instruction à n'exécuter qu'une
seul fois ;
}
Void loop ()
{
Instructions qui seront répétées
indéfiniment ;
}

```

Quelques principales instructions :

- **PinMode()** : pour configurer une pin comme un entrée ou une sortie, elle a 2 arguments le numéro du pin et le mode, en mettant High pour sortie et low pour l'entrée.

Les entrées/sorties numériques est confiée à trois fonctions :

- **DigitalRead ()** : il permet de lire l'état retourné par un pin, elle a comme argument le pin à lire.
- **DigitalWrite ()** : il permet de donner un état à un pin, elle a comme argument le pin.
- **AnalogRead()** : permet de lire le résultat de la conversion de la tension présente sur l'entrée analogique sélectionnée, et elle utilisé comme suit :
tension = analogRead(entree)
- **AnalogWrite()** : est utilisée pour définir les signaux PWM de la façon suivante ;
analoWrite(sortie, rapportcyclique)
- **Serial.begin()** : Cette fonction doit être dans la fonction « setup() » du programme, afin de définir la vitesse utilisée sur la liaison série. La syntaxe est simple :
Serial.begin(vitesse)
Vitesse peut prendre l'une des valeurs de vitesse normalisée suivante : 300, 1200, 2400, 4800, 9600, 14400, 19200, 28800, 38400, 57600 et 11500. Mais il est également possible de spécifier une vitesse non normalisée si nécessaire.
- **Serial.print()**
Elle permet de faire sortir, sur la liaison série, une ou plusieurs données et de préciser leur mode de codage afin de faciliter leur affichage sur un terminal, sur un afficheur alphanumérique à cristaux liquides ou bien encore sur tout dispositif acceptent en entrée du code ASCII pour permettre leur affichage de façon lisible. Ainsi par exemple :
Serial.print (47) fera afficher 47 ;

Serial.print(« Arduino ») fera afficher Arduino ; Et ainsi de suite.

- **Serial.println()**

Elle s'utilise exactement comme serial.print et dispose les mêmes options de formatage mais elle termine chaque ligne de données affichées par les caractères saut ligne et retour chariot.

Description du module PWM (MLI) :

Le module PWM (pulse width modulation) ou MLI (modulation à largeur d'impulsion) offre huit unités de comparaison indépendantes capables de comparer une valeur programmée au compteur de la chaîne synchrone (compteur de la chaîne 0), avec la possibilité de générer des interruptions ou de basculer l'état du signal de sortie. Les caractéristiques du signal de sortie du pin PWM (rapport cyclique, période, temps mort. etc.) sont configurées à travers l'interface de l'utilisateur (IDE). Chaque chaîne utilise un signal d'horloge généré par le générateur d'horloge. L'accès au module PWM se fait à travers les registres liés au bus de périphéries.

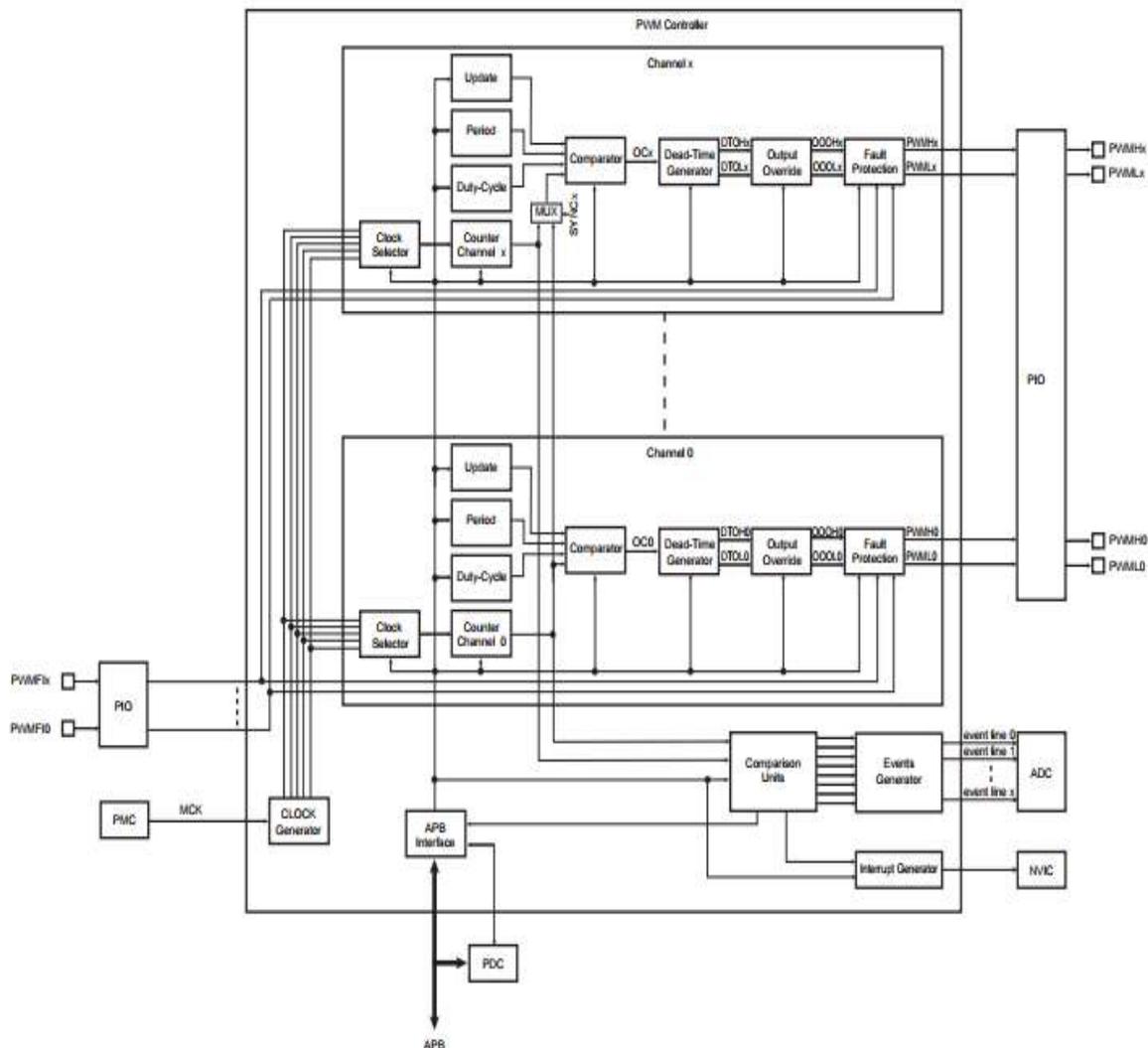


Diagramme du module PWM.

Les lignes entrées/sorties :

Les pins utilisés pour attachés la fonction PWM sont multipliés par les lignes d'entrées sorties parallèle PIO. D'abord on programme le contrôleur des entrées sorties parallèle (PIO Controller) pour attacher les pins de la fonction PWM désirées à leur périphérie fonction. Si une ligne entrée/sortie de PWM n'est pas utilisée par l'application, ce dernier peut être utilisé pour d'autres propositions proposées par le contrôleur des entrées sorties parallèle (PIO Controller).

Les chaines peuvent être synchronisées ensemble pour générer des signaux de sortie synchronisées avec des rapports cycliques différents. L'actualisation des rapports cycliques des chaines synchronisées peut être réalisée par la périphérie DMA Controller Channel (PDC), qui offre un transfert tampon sans la nécessité de l'intervention du processeur.

Chaque chaine a deux Lignes Entrées/sorties complémentaire :

Nom	description	Type
PWMHx	Signal de sortie PWM haut pour chaine x	Sortie
PWMLx	Signal de sortie PWM bas pour chaine x	Sortie

Chaque chaine est composée de quatre blocks :

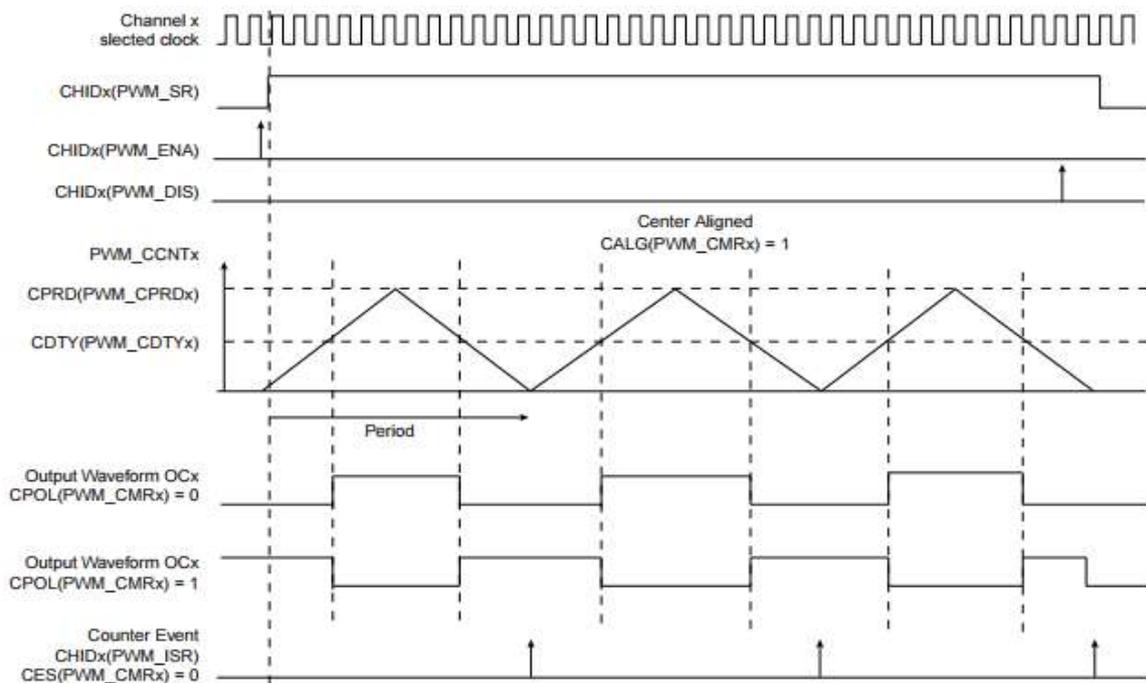
- Un sélecteur d'horloge qui sélectionne un des horloges donnée par l'horloge principale.
- Un compteur synchronisé par la sortie du sélecteur d'horloge. Ce compteur de 16 bits incrémenté ou décrémenté correspond à la configuration de la chaine.
- Un comparateur utilisé pour calculer la forme d'onde de sortie OCx en fonction de la valeur du compteur et de la configuration. La valeur du compteur peut être celle du compteur de la chaine x ou celle du compteur de la chaine 0 en fonction du bit SYNCx dans le "Registre PWM Sync Channels Mode" PWM_SCM.
- Un générateur de temps mort fournissant deux sorties complémentaires (temps mort haut de la chaine x DTOHx et temps mort bas de la chaine x DTOLx) qui permet de piloter les interrupteurs de commande de puissance en sécurisés.

On peut configurer chaque chaine x du module PWM en deux modes distinctes :

1. Left aligned Mode : ou le compteur de la chaine x (PWM_CCNTx) incrémente de 0 a la valeur du registre de période (PWM_CPRDx) puis il remet à 0.
2. Centre Aligned Mode : ou le compteur de la chaine x (PWM_CCNTx) incrémente de 0 à la valeur du registre de période (PWM_CPRDx) puis il décrémente de cette valeur a 0.

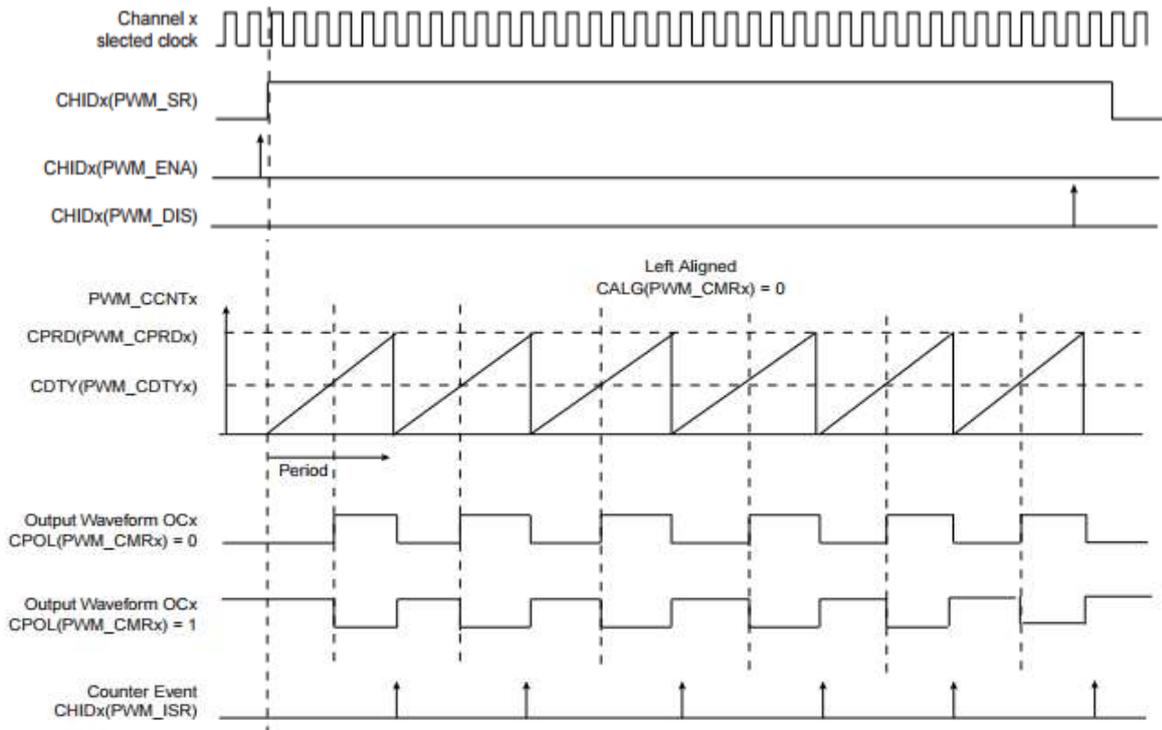
La sortie de chaque chaine x du modèle PWM peut être configurée en deux polarités différentes :

- (PWM_CMRx(CPOL=1)) : Signal au niveau haut au début du période puis il passe au niveau bas lorsque la valeur du registre de compteur (PWM_CCNTx) devient supérieur à la valeur du registre de période (PWM_CDTYx).



forme d'onde en mode Center Aligned.

- (PWM_CMRx(CPOL=0)) : Signal au niveau bas au début du période puis il passe au niveau haut lorsque la valeur du registre de compteur (PWM_CCNTx) devient supérieur à la valeur du registre de période (PWM_CDTYx).



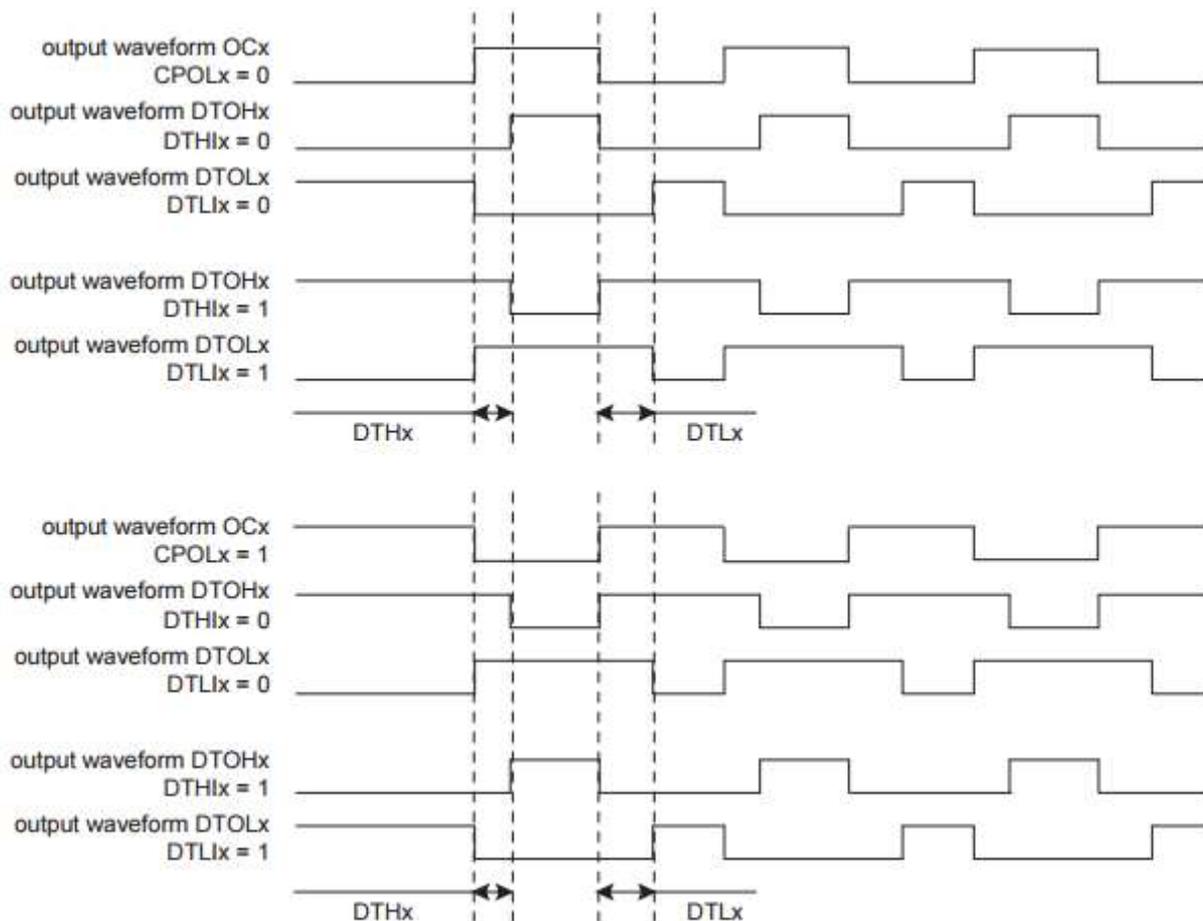
forme d'onde en mode Left Aligned

Générateur de temps mort :

Le générateur de temps mort utilise la sortie du comparateur OCx pour fournir les deux sorties complémentaires DTOHx et DTOLx, qui permet à la macrocellule PWM de piloter des commutateurs de contrôle de puissance externes en toute sécurité. Pour activer le temps mort on met 1 dans le bit DTE dans le registre (PWM_CMRx "PWM Channel Mode Register").

Le temps mort est réglable par le "PWM Channel Dead Time Register" (PWM_DTx). Les deux sorties du générateur de temps mort peuvent être réglées séparément par DTH et DTL. Les valeurs de temps mort peuvent être mises à jour de manière synchrone à la période PWM à l'aide du "Registre de mise à jour des temps morts du canal PWM" (PWM_DTUPDx).

Le temps mort est basé sur un compteur spécifique qui utilise la même horloge sélectionnée qui alimente le compteur de canaux du comparateur. En fonction du front et de la configuration du temps mort, DTOHx et DTOLx sont retardés jusqu'à ce que le compteur ait atteint la valeur définie par DTH ou DTL. Un bit de configuration inversé (bits DTHI et DTLI dans le registre PWM_CMRx) est prévu pour chaque sortie afin d'inverser les sorties de temps mort. La figure suivante montre la forme d'onde du générateur de temps mort.



forme d'onde du générateur de temps mort.

Synchronisation des chaines :

Certaines chaines peuvent être reliés entre eux en tant que chaines synchronisées. Ils ont le même horloge source, la même période, le même alignement et sont démarrés ensemble. De cette façon, leurs compteurs sont synchronisés ensemble. Les chaines synchronisées sont définis par les bits SYNCx dans le "PWM Sync Channels Mode Register" (PWM_SCM). Un seul groupe de canaux synchrones est autorisé.

Opérations du contrôleur PWM :

Avant d'activer les chaines, ils doivent avoir été configurés par l'environnement de développement (IDE):

- déverrouillez l'interface utilisateur en écrivant le champ WPCMD dans le registre PWM_WPCR.
- Configurer le générateur d'horloge (DIVA, PREA, DIVB, PREB dans le registre PWM_CLK si nécessaire).
- Sélection de l'horloge pour chaque chaine (champ CPRE dans le registre PWM_CMRx)
- Configurer l'alignement de la forme d'onde pour chaque canal (champ CALG dans le registre PWM_CMRx)
- Configurer la polarité de la forme d'onde de sortie pour chaque canal (CPOL dans le registre PWM_CMRx)
- Configurer la période pour chaque canal (CPRD dans le registre PWM_CPRDx).
- PWM_CPRDUPDx s'enregistre pour mettre à jour PWM_CPRDx.
- configurer le rapport cyclique pour chaque chaine (CDTY dans le registre PWM_CDTYx).
- Après validation de la chaîne, l'utilisateur devez utiliser PWM_CDTYUPDx register pour mettre à jour PWM_CDTYx .
- Configurer le générateur de temps mort pour chaque chaine (DTH et DTL dans PWM_DTx) si activé (bit DTE dans le registre PWM_CMRx).
- Sélectionner les chaines synchronisées (SYNCx dans le registre PWM_SCM)