



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université SAAD Dahlab Blida-1

Institut d'aéronautique et des études Spatiales

Département des études spatiales

Mémoire de fin d'études

En vue de l'obtention du diplôme de

Master en Aéronautique

Option : AVIONIQUE

**« Etude et conception d'une chaine de générateur
électrique pour l'avionique embarqué »**

Proposé et dirigé par :

Mr KRIM Mohamed

Réalisé par :

Belmehdi Zakaria

Soutenue devant le jure composer de :

Pr. LEBSIR abdelkadir

Président

Professeur

Dr KHELIFA Yamina

MCA

Examineur

Dr. KRIM Mohamed

MCB

Examineur

Promotion: 2022 / 2023

Remerciement

REMERCIEMENT

Il est particulièrement agréable, avant de présenter notre travail, d'exprimer nos gratitudees envers les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

On remercie tout d'abord les membres du jury pour l'honneur qu'ils ont accordé pour avoir accepté d'évaluer ce travail.

Qu'il nous soit permis d'adresser nos remerciement à notre encadreur, Dr. Krim Mohamed, pour la qualité de son encadrement et pour tous les conseils précieux qu'il nous a prodigués.

DEDICACES

le grand merci revient de nous avoir aidés à établir ce mémoire de dissertation scientifique. -Nos remerciements à nos parents qui nous ont aidé moralement, financièrement, et qui étaient toujours patients et compréhensifs envers nous, et qui ont su nous mettre sur rails et nous encourager, encore mille fois merci.

-Nous remercions vivement notre encadreur Mr KRIM Mohamed à qui nous exprimons notre gratitude et reconnaissance pour son aide, ses conseils judicieux et sa disponibilité tout au long de l'élaboration de ce mémoire.

-Nous remercions également notre chef de département ainsi que tous les enseignants.

-Notre grand respect à notre

Résumé :

Dans l'étude du système de la conception d'une chaîne générateur électrique pour l'avionique embarquée. Cette Technologie devient plus intégrée dans les systèmes connectés à réseaux électrique de puissance, selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue pour l'application l'avionique embarquée. Motivation de la recherche et objectif du projet et premièrement étudie une méthode d'évaluation de la performance de la puissance d'un système autonome avec son système de charge. En suite la méthode s'applique à de petits systèmes embarque équipés d'un générateur à aimant permanent couplé à un système d'énergie, suivi d'un convertisseur statique et d'une batterie. Pour extraire la puissance maximale de puissance disponible et maximiser la puissance délivrée à la charge reliée à ses bornes de cette chaîne de conversion, un algorithme de suivi du point de fonctionnement optimal de ce système est développé sous Matlab/Simulink. Les résultats obtenus par simulation montrent que le rendement du système est très encourageant.

Mots Clés : Système Embarqué, MPPT, Convertisseur Statique, Batterie.

ملخص:

في دراسة نظام تصميم سلسلة مولدات كهربائية لإلكترونيات الطيران على متن الطائرة. تصبح هذه التكنولوجيا أكثر تكاملاً في الأنظمة المتصلة بشبكات الطاقة، اعتماداً على مصدر الطاقة القِيم والطاقة المفيدة التي يتم الحصول عليها لتطبيق إلكترونيات الطيران على متن الطائرة. تحفيز البحث والهدف من المشروع والدراسة الأولى لطريقة تقييم أداء قوة نظام مستقل مع نظام التحميل الخاص به. ثم تنطبق الطريقة على الأنظمة الصغيرة المزودة بمولد مغناطيس دائم مقترن بنظام طاقة، يليه محول ثابت وبطارية. لاستخراج الطاقة القصوى المتاحة وتعظيم الطاقة التي يتم تسليمها إلى الحمل المتصل بمحطات سلسلة التحويل هذه، يتم تطوير خوارزمية لتتبع نقطة التشغيل المثلى لهذا النظام تحت Matlab/Simulink تظهر نتائج المحاكاة أن أداء النظام مشجع للغاية.

الكلمات المفتاحية: نظام مدمج، MPPT، محول ثابت، بطارية.

Summary:

In the study of the system of the design of an electrical generator chain for onboard avionics. This Technology becomes more integrated in the connected systems with power grids, depending on the valued energy source and the useful energy obtained for the application of on-board avionics. Motivation of the research and objective of the project and first study a method of evaluating the performance of the power of an autonomous system with its load system. Then the method applies to small systems fitted with a permanent magnet generator coupled to an energy system, followed by a static converter and a battery. To extract the maximum power available and maximize the power delivered to the load connected to its terminals of this conversion chain, an algorithm for tracking the optimal operating point of this system is developed under Matlab/Simulink. The simulation results show that the performance of the system is very encouraging.

Keywords: Embedded System, MPPT, Static Converter, Battery.

REMERCIEMENT
DEDICACES
RESUMES
TABLE DES MATIERES

1. Introduction générale :	1
2. Historiquement :	2
3. Motivation de la recherche et objectif du projet :	4
3. Plan de lecture :	5
I- Chapitre I : Généralités sur Production l'énergie du Système des avions	7
1. Introduction :	7
1.1 Historique :	7
1.2 Production de l'énergie électrique :	9
1.2.1. Des énergies renouvelables :	9
1.2.2 Différentes sources d'énergie mises en œuvre dans un avion à réaction :	11
1.3 L'énergie à bord des avions :	12
1.3.1 Sources primaires d'énergie des avions :	12
1.4 Principaux vecteurs énergétiques des avions :	14
1.4.1 Systèmes à puissance pneumatique :	16
1.4.2 Systèmes à puissance hydraulique :	16
1.4.3 Systèmes à puissance électrique :	18
1.4.4 L'avion plus électrique : [10]	20
1.4.5 Avion « Hydraulicless » :	21
1.4.6 Avion « Bleedless » :	22
1.4.7 L'avion solaire	23
1.5 Le système photovoltaïque :	23
1.5.1 L'énergie solaire photovoltaïque :	24
1.5.2. Principe de l'énergie solaire photovoltaïque :	24
1.5.3. Les générateurs photovoltaïques :	26
1.5.4. Protection D'un GPV :	35
1.6 Conclusion	37
II. Chapitre 2 : Etude théorique des convertisseurs et leur modelé de conception étudié :	39
1. Introduction:	39
2 . Le réseau de bord de l'avion plus électrique :	39
2.1 Fonction F1 : Générer la puissance électrique :	40

2.2.	. Fonction F2 : Adapter les niveaux de tension :	41
2.3	Fonction F3 : Distribuer la puissance électrique	42
2.4	Fonction F4 : Gérer les charges	43
3.	Les convertisseurs statiques des puissances :	43
3.1	Fonctions de base et terminologie des convertisseurs statiques :	43
3.1.1	Les différents convertisseurs	45
3.2.1	Représentation d'un hacheur survolteur PV	62
3.3	Electronique de puissance et d'énergie des convertisseurs	64
3.3.1	Electronique de puissance :	64
3.3.2	Convertisseurs des Puissances	64
3.3.3	Convertisseurs d'Energie	66
3.3.4	Fonctionnement du convertisseur électronique de puissance	66
3.4	Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque et contrôlé par MPPT	67
3.4.1	Principe De La Commande MPPT	67
3.4.2	Gestion de la MPPT	68
3.5	Cheminement maximum de Power Point (MPPT)	69
3.5.1	Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque :	69
3.6	Les convertisseurs DC/AC (Onduleur)	71
3.6.1	Principe de fonctionnement d'un onduleur	72
3.6.2	Système photovoltaïque hybride turbine relié à une grille	72
3.7	Conclusion	74
III.	Chapitre 3 :Simulation et Performance d'impact l'énergie du Système Hybride PV - Turbine des avions	76
3.	Introduction	76
3.1	Modélisation du système hybride :	76
3.2	Description du système hybride :	78
3.2.1	Générateur photovoltaïque (GPV)	78
3.2.2	Système photovoltaïque connecté au réseau électrique	78
	Principe du fonctionnement d'un système Photovoltaïque connecté au réseau :	78
3.2.3	Générateur éolien	79
3.2.4	Classifications des éoliennes selon la puissance	80
3.2.5	Zones de fonctionnement de l'éolienne	80
3.2.6	Convertisseur survolteur (BOOST) avec commande MPPT	81
3.3.4	Modèle réelle d'une cellule photovoltaïque sous Matlab	85
3.3.5	Simulation d'un système de convertisseur avec MPPT	87
1-	Système Photovoltaïque avec MPPT	91

1.2	Résultats à la sortie du convertisseur avec MPPT:	92
2.	Système Photovoltaïque sons MPPT	94
2.1	Résultats à la sortie du GPV sons MPPT:	94
3.3.6	Système hybride photovoltaïque turbine connecté au réseau table de bord avion :	98
3.4	Conclusion :	107

CONCLUSION GENERALE

BIBLIOGRAPHIE

LISTE DES FIGURES

FIGURE	PAGE
Figure 1.1 – Puissance électrique embarquée à bord des avions	7
Figure 1.2 : l'avion solaire « Solar Impulse 2 ». L'aéroplane Solar Impulse 2, à Payerne, en Suisse. Jean Revillard/AP	9
La figure 1.3 : représente les six familles de technologies de production d'électricité:	10
Figure. 1.4 : Différentes sources d'énergie mises en œuvre dans un avion à réaction	11
Figure 1.5 : – Turboréacteurs à double flux	13
Figure 1.6 – APU en queue d'avion	14
Figure 1.7 – Ram Air Turbine	14
Figure 1.8 – Puissance non propulsive consommée au cours d'un vol	15
Figure 1.9 – Alimentation des actionneurs de commandes de vol de l'A320 et localisation des surfaces de contrôle pour les commandes de vol de l'A320	18
Figure 1.10 –Roue motorisée pour un roulage plus « vert » (Projet de recherche pour une industrialisation en 2016)	22
Figure 1.11 –Essai d'EMA comme actionneur de commande de vol primaire pour un aileron d'A320 (Projet de recherche)	22
Figure 1.12 :L'énergie solaire photovoltaïque	24
Figure 1.13 : Caractéristique courant-tension de (N_s) cellule série .	24
Figure 1.14 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.	25
Figure 1.15 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.	26
Figure 1.16 : L'effet photovoltaïque	27
Figure 1.17 :Exemple d'un matériau semi-conducteur dopé (Le Silicium).	27
Figure 1.18 : Évolution de la taille des cellules silicium photovoltaïques ces dernières années.	28
Figure 1.19 : Encapsulation des cellules.	30
Figure 1.20 : Caractéristique courant-tension de (N_s) cellule série .	32
Figure 1.21 : Caractéristique courant tension de (N_p) cellule parallèle .	33
Figure 1.22 : Caractéristique de puissance en fonction de la tension $P=f(U)$ d'une cellule photovoltaïque	34
Figure 1.23 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec Diodes By-Pass et Diode Anti-Retour	36
Figure 2.1 –Conversions électriques dans le réseau de bord avion	42

Figure 2.2 : Réversibilité et non réversibilité des convertisseurs statiques	44
Figure 2.3 : Architecture générique d'un convertisseur statique	44
Figure 2.4 : les différents types de convertisseurs statiques	46
Figure 2.5 : Symbole d'un convertisseur DC-DC	46
Figure 2.6 : Convertisseur DC/DC	46
Figure 2.7 : Représentation symbolique et notation Pour le MOSFET et IGBT	48
Figure 2.8 : Schéma équivalent d'une inductance réelle L	49
Figure 2.9 : Schéma de convertisseur Boost.	50
Figure 2.10 : Schéma électrique d'un hacheur Boost fermé.	51
Figure 2.11 : Circuit équivalant pour T_{on} .	51
Figure 2.12 : Circuit équivalant pour T_{off} .	52
Figure 2.13 : Forme du courant i_1 et i_2	53
Figure 2.14 : Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Boost	54
Figure 2.15 : Schéma électronique de convertisseur abaisseur Buck.	55
Figure 2.16 : Convertisseur Buck Durant l'état On.	56
Figure 2.17 : Convertisseur Buck Durant l'état Off.	57
Figure 2.18 : Caractéristique de la tension et des courants dans le transistor et l'inductance d'un convertisseur Buck	58
Figure 2.19 : Variation de la tension de charge avec le courant de charge Pour un convertisseur Buck	58
Figure 2.20 : Schéma de convertisseur inverseur Buck-Boost	59
Figure 2. 21 : Convertisseur Buck-Boost Durant l'état On.	59
Figure 2.22 : Convertisseur Buck-Boost Durant l'état Off.	60
Figure 2.23 : Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Buck-Boost	60
Figure 2.24 : Schéma d'un hacheur parallèle (Boost) raccordé au générateur photovoltaïque	63
Figure 2.25 : Couplage de convertisseur avec un récepteur.	65
Figure 2.26 : Convertisseur de commutation	67
Figure 2.27 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.	67

Figure 2.28 : Principe de la commande MPPT.	68
Figure 2.29: Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale	69
Figure 2.30 : Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation (P&O).	71
Figure 2.31 : Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative DC-AC monophasé et triphasé.	71
Figure 2.32: Architecture possible du système PV avec contrôleur raccordée au réseau (Une réalisation possible de convertisseur de puissance).	73
Figure 3.1 : Système hybride PV - Turbine des avions (a) model de la conception,	77
Figure 3.2 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique (système globale)	78
Figure 3.3 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	79
Figure 3. 4: Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.	80
Figure 3. 5: Schéma de simulation d'une cellule photovoltaïque idéale.	82
Figure 3. 6: Modèle de simulation d'une cellule photovoltaïque photovoltaïque idéale.	83
Figure 3. 7: Résultats de simulation de Caractéristique P-V d'une cellule PV.	84
Figure 3. 8: Résultats de simulation de Caractéristique I-V d'une cellule PV.	84
Figure 3. 9: Schéma de simulation d'une cellule photovoltaïque réelle.	85
Figure 3. 10: Modèle de simulation d'une cellule photovoltaïque réelle.	85
Figure 3. 11: Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension Pour différents insolation et une température $T=25^{\circ}\text{C}$.	86
Figure 3.12: Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension Pour différents insolation et une température $T=25^{\circ}\text{C}$.	87
Figure 3.13: Schéma bloc de la simulation d'un système PV avec la commande MPPT sous Matlab/Simulink .	88
Figure 3.14: Schéma block de la commande MPPT« perturbation-observation » sous Matlab/Simulink.	89
Figure 3.15: Schéma bloc de la commande MLI sous Matlab/Simulink.	89
Figure 3.16: Résultats de simulation de la tension générée par le générateur photovoltaïque pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^{\circ}\text{C}+273.15$.	91
Figure 3.17: Résultats de simulation du courant généré par le générateur photovoltaïque pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^{\circ}\text{C}+273.15$.	91
Figure 3.18: Résultats de simulation de la puissance générée par le générateur photovoltaïque pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^{\circ}\text{C}+273.15$	92
Figure 3.19: Résultats de simulation de la tension de sortie du système pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^{\circ}\text{C}+273.15$.	92
Figure 3. 20: Résultats de simulation du courant de sortie du système pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^{\circ}\text{C}+273.15$.	93

Figure 3.21: Résultats de simulation de la tension générée par le générateur photovoltaïque pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}+273.15$.	94
Figure 3.22: Résultats de simulation du courant généré par le générateur photovoltaïque pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}+273.15$.	95
Figure 3.23: Résultats de simulation de la puissance générée par le générateur photovoltaïque pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}+273.15$	95
Figure 3.2 4: Résultats de simulation de la tension de sortie du système pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}+273.15$.	96
Figure 3.2 5: Résultats de simulation du courant de sortie du système pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}+273.15$.	96
Figure 3.2 6: Résultats de simulation de la puissance de sortie du système pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$.	97
Figure 3.2 7: Résultats de simulation du courant de sortie onduleur du système PV courbe de courant entre une seule phase de réseau	99
Figure 3.2 8: Résultats de simulation de la tension sortie onduleur du système PV courbe de tension entre une seule phase de réseau.	99
Figure 3.2 9: Résultats de simulation du courant de réseau électrique 3Φ	100
Figure 3. 30: Résultats de simulation de la tension de réseau électrique 3Φ .	100
Figure 3. 31: Déphasage de courant et tension entre une seule phase de réseau.	101
Figure 3.3 2: La tension de ligne de la charge	101
Figure 3.33: Le courant de ligne de la charge	102
Figure 3.34 : Spectre du courant de la charge	102
Figure 3.35 : Système hybride PV - Turbine des avions Model simulation sous MATLAB	102
Figure 3.36: La tension de ligne de la charge	104
Figure 3. 37: Spectre de la tension de la charge	105
Figure 3.38: Le courant de ligne de la charge	105
Figure 3.39 : Spectre du courant de la charge	105

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Répartition des puissances électriques embarquées à bord des avions	8
Tableau 2 : Différent les types des cellules et leurs avantages et inconvénients	29
Tableau. 3 : Comparaison les principaux convertisseurs DC-DC .	62
Tableau 4 : Classification des éoliennes	80
Tableau 5 .Valeurs des paramètres de simulation caractéristique de la cellule de module KC-60.	83
Tableau 6 .Valeurs des paramètres de simulation.	86
Le Tableau 7 présente la variation de la puissance para port la charge avec MPPT	90
Le Tableau 8 présente la variation de la puissance para port la charge sons MPPT	90

1. Introduction générale :

Les avions modernes embarquent un équipement électrique de plus en plus important, tant pour les commandes de vol que pour le confort des passagers. La demande croissante d'énergie électrique s'accompagne inévitablement d'une remise en cause des solutions mises en œuvre par le passé en termes de types de générateur et de réseau employés dans les avions.

Un avion est un système complexe qui, pour assurer sa mission, dispose d'une source principale d'énergie, à savoir le kérosène contenu dans ses réservoirs. A partir de cette source d'énergie, différents éléments permettent l'alimentation en énergie des sous-systèmes de l'avion. Généralement, on identifie deux vecteurs énergétiques principaux :

- Le circuit hydraulique, dédié principalement aux commandes de vol.
- Le circuit électrique, alimentant certaines commandes de vol, le système de pressurisation de l'air, l'éclairage ainsi que tous les équipements électriques et/ou électroniques se trouvant dans l'avion.

La source d'énergie primaire dans un avion se situe au niveau des turbines des réacteurs, les générateurs électriques et les pompes hydrauliques étant entraînées par ces derniers. Néanmoins, d'autres sources d'énergie existent, notamment dans des phases de fonctionnement particulières :

- Générateur auxiliaire utilisé au sol (APU: Auxiliary Power Unit).
- Eolienne de secours (RAT: Ram Air Turbine) pour l'alimentation hydraulique en cas de panne des réacteurs.
- Générateur électrique de secours (CSM/G: Constant Speed Motor/Generator).

A l'heure actuelle, la direction prise par les constructeurs aéronautiques (principalement Airbus et Boeing) tend à remplacer progressivement les actionneurs hydrauliques par des actionneurs purement électriques. En effet, on parle notamment d'actionneurs électro-hydrauliques (EHA: Electro Hydraulic Actuators)¹ et d'actionneurs purement électromécaniques (EMA: Electro Mechanical Actuators).

On peut citer pour cela les exemples suivants :

- Freins de l'airbus A380 (Messier-Bugatti, groupe Safran)

Cette stratégie s'accompagne inévitablement d'une augmentation considérable de la puissance électrique consommée, ce qui a un impact

important sur le dimensionnement du réseau de bord et des générateurs électriques embarqués.

Comme dans de nombreux secteurs industriels, ce « saut technologique » important offre l'occasion d'une refonte complète des choix de structures de générateurs voire d'architecture de réseau employé dans les avions. Des mutations se sont déjà produites et d'autres sont en cours à l'heure où on annonce des puissances embarquées (électriques) de l'ordre 1MVA sur les gros porteurs.

2. Historiquement :

les premiers avions étaient équipés de génératrices à courant continu pour l'alimentation des quelques appareils électriques embarqués : la tension était alors de 48V. Il faut noter d'ailleurs que ce type d'alimentation est toujours utilisé dans les hélicoptères et que des solutions de ce genre sont commercialisées par des équipementiers tels que la société Thalès AES.

L'augmentation de la consommation électrique a imposé par la suite un changement de type de réseau, l'aviation suivant de ce fait le même chemin que les réseaux terrestres, avec une fourniture d'énergie électrique source forme triphasée sous 110V et 400Hz. L'utilisation d'une fréquence plus élevée que 50 ou même 60Hz étant liée au gain en poids et encombrement des machines et transformateurs utilisés (ce critère étant incontournable dans les applications tant aéronautiques que spatiales).

Pour sa facilité de maîtrise par rapport aux énergies hydraulique et pneumatique, et la réduction du poids global, l'énergie électrique est de plus en plus utilisée sur les avions modernes.

C'est dans le domaine du modélisme qu'a été conçu le premier avion solaire. Baptisé Sunrise I, ce modèle a effectué son premier vol le 4 novembre 1974 à Camp Irwin, en Californie.

Cet avion propulsé à l'énergie solaire a été créé par R.J. Boucher de la compagnie Astro Flight Inc. Il avait une envergure de 9,76 m pour 12,25 kg. Lors de son vol inaugural, il a volé 20 minutes à une altitude d'environ 100 mètres.

Une deuxième version améliorée a été construite sous le nom de Sunrise II et inaugurée le 12 septembre 1975.

Son poids avait été réduit à 10,21 kg pour la même envergure.

Ces deux modèles réduits ont permis de réaliser une Première démonstration de la technologie solaire appliquée à l'aviation.

L'avion solaire a également inspiré des projets scientifiques comme le projet Helios de la NASA en 2001.

Il s'agissait d'un projet d'"avion éternel", embarquant un stockage d'énergie pour pouvoir voler en continu pendant plus de 24 heures.

A terme, l'objectif serait de concevoir des avions solaires capables de voler pendant des semaines, voire des mois, pour réaliser des missions scientifiques, des missions d'imagerie ou pour servir de relais de communication.

Les avions solaires pourraient même jouer un rôle majeur dans l'exploration planétaire. En 2004, l'Agence Spatiale Européenne ou Esa a ainsi lancé le projet Sky-Sailor, un avion solaire destiné à participer à l'exploration de Mars. Le premier prototype, pesant 2,6 kg pour une envergure de 3,2 m, a d'ores et déjà été testé avec succès durant des vols autonomes de quelques heures.

Un autre projet en cours est celui du Suisse Bertrand Piccard qui envisage de faire le Tour du monde en 5 escales à bord d'un avion solaire monoplace.

Ce projet baptisé Solar Impulse a été lancé en 2003 et il est passé à la phase de construction du prototype en 2007.

L'avion, qui sera composé de deux grandes ailes recouvertes d'environ 200 m² de panneaux solaires, devrait être construit en 2010 pour un premier vol prévu en 2011.

Pour en savoir plus sur ce défi technique, rendez-vous sur le site officiel ci-dessous.

La génération électrique d'un avion utilise principalement deux types de courants :

- Le courant alternatif qui est produit directement par des alternateurs, ou par les batteries passant par un convertisseur statique en cas d'urgence.
- Le courant continu, produit directement par les batteries en cas d'urgence, ou, en cas de fonctionnement normal, par le passage du courant alternatif à travers des transformateurs redresseurs.
- Un banc de charge est essentiel pour la maintenance de certains équipements aéronautiques, car il est impossible de tester certains composants spécifiques de manière durable à bord de l'avion.

Ce travail est essentiellement basé sur l'Etude théorique d'une méthode d'évaluation de la performance de la puissance d'un système autonome avec

son système de charge et leur application de l'avion exemple (l'A330-200), et la conception de son banc de charge.

Dans l'étude du système de la conception d'une chaîne générateur électrique pour l'avionique embarquée. Cette Technologie devient plus intégrée dans les systèmes connectés à réseaux électrique de puissance, selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue pour l'application l'avionique embarquée. L'objectif de ce travail, est visé pour proposer de techniques de système générateur électrique embarqué qui est équipé d'un module électrique photovoltaïque qui constitué d'un assemblage de cellules qui transforment directement l'énergie lumineuse du soleil en électricité avec d'un ensemble de système convertisseur électrique statique Hacheur Élévateur (DC-DC) et qui survolteur commandé par un point de puissance maximale (MPPT), avec l'algorithme de perturbation et d'observation (P&O), qui permettra au générateur du module photovoltaïque (GPV) de fonctionne à sa puissance maximal et s'occupera de la régulation de charge et décharge des batteries rechargeables en Lithium sont les plus utilisées puisqu'elles cumulent plusieurs avantages par rapport aux accumulateurs standards. Finalement clôturer le tout, sous forme d'une simulation de notre système fait grâce au logiciel sous MATLAB /Simulink qui résumera les différentes parties du système est proposée.

3. Motivation de la recherche et objectif du projet :

L'objectif de ce mémoire est :

- ✓ De dresser un état de l'art dans le domaine de la génération d'énergie électrique dans les avions et d'introduire des architectures innovantes de générateurs en fonction du « format » électrique retenu (réseau alternatif à fréquence fixe ou variable, réseau à courant continu).
- ✓ Améliorer le rendement du générateur électrique du générateur photovoltaïque (GPV) autonome du l'ail avionique, autrement dit en extraire le maximum de puissance disponible et maximiser la puissance délivrée à la charge reliée à ses bornes en utilisant des algorithmes de suivi du point de fonctionnement optimal de ces système.
- ✓ Les avantages des batteries rechargeables en Lithium sont:
 - Grande densité d'énergie/Très stable ,
 - Large gamme de température de fonctionnement et
 - le Temps de charge/décharge.
- ✓ Pour assurer la meilleure autonomie du système embarqué, la régulation de la charge/décharge de la batterie est alors indispensable. Pour cela, il

faut intercaler dans le système un régulateur, dont le rôle sera d'augmenter sa durée de vie.

- ✓ Etude une méthode d'évaluation de la performance de la puissance d'une turbine autonome avec son système de charge. La méthode s'applique à de petits systèmes équipés d'un générateur à aimant permanent couplé à une turbine hybride, suivi d'un redresseur ou onduleur et d'une batterie. Pour extraire la puissance maximale de cette chaîne de conversion, un algorithme est développé sous Matlab. Les résultats obtenus par simulation montrent que le rendement du système est très encourageant.

3. Plan de lecture :

Dans ce mémoire, nous proposons le plan de lecture suivant :

- 1- Introduction Avionique embarqué
- 2- Le premier chapitre L'avion plus électrique,
- 3- Le deuxième chapitre nous aborderons les concepts sur l'énergie hybride électrique avionique solaire ainsi que son exploitation à travers les panneaux photovoltaïques.
- 4- Le troisième chapitre viendra clôturer le tout, sous forme d'une simulation de notre système « Model de la conception d'une chaine photovoltaïque pour l'avionique embarquée » faite grâce au logiciel Simulation de notre système faite grâce au logiciel « MATLAB »
- 5- Enfin, les principales conclusions ainsi que les perspectives de ce travail.

Chapitre I :
Généralités sur Production
l'énergie du Système des avions

I- Chapitre I : Généralités sur Production l'énergie du Système des avions

1. Introduction :

Ce chapitre traite de l'avion plus électrique. On vous demande de l'analyser et de mettre en avant ce qui vous semble important. Vous pouvez aussi synthétiser les avancées entre un avion conventionnel et un avion plus électrique.

1.1 Historique :

Au début des années 1900, les frères Wright utilisèrent une machine électrique pour le démarrage des moteurs à hélices des avions Wright Flyer. Il s'agissait donc avant l'heure d'un démarrage moteur 100 % électrique ! Près d'un siècle plus tard, l'énergie électrique partage, avec les vecteurs hydraulique et pneumatique, la tâche d'alimenter 5 les systèmes non propulsifs des avions.

La dernière décennie a vu l'intensification de l'usage de l'électricité à bord des aéronefs. Cette tendance, connue sous la terminologie d'« avion plus électrique », transforme des systèmes traditionnellement alimentés de manière hydraulique ou pneumatique par des 10 équipements fonctionnant à l'énergie électrique. Cette électrification de l'avion se traduit par une augmentation de la puissance électrique embarquée à bord des avions (Figure 4) répartie sous différentes formes (Tableau 1).

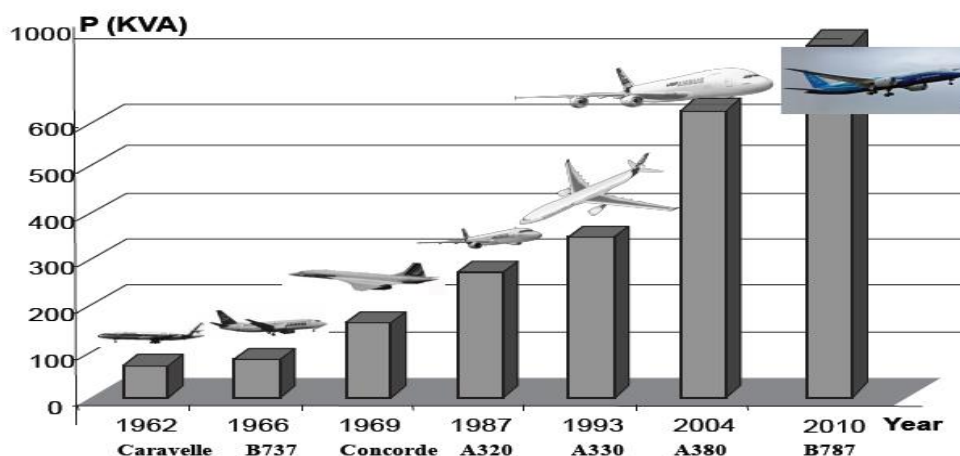


Figure 1.1– Puissance électrique embarquée à bord des avions[1]

Type d'avion	Générateurs DC	Générateurs AC à fréquence variable	Générateurs AC à fréquence fixe
caravelle	27KW – 28V	2 × 18K VA	
concorde			4 × 60K VA
B747			4 × 90K VA 2 × 90K VA (APU)
A320			2 × 90K VA 1 × 90K VA (APU)
A330-200			4 × 75K VA 1 × 115K VA (APU)
A380		4 × 150K VA	2 × 120K VA (APU)
B787		4 × 150K VA 2 × 225K VA	
A350		4 × 100K VA	1 × 150K VA

Tableau 1 – Répartition des puissances électriques embarquées à bord des avions[1]

Premier vol réussi pour l'avion solaire « Solar Impulse 2 ».

L'avion suisse « *Solar Impulse 2* », uniquement propulsé à l'énergie solaire, a réussi tôt lundi son premier vol d'essai sur la base aérienne de Payerne, dans le centre de la Suisse. Avec aux commandes le pilote d'essai allemand Markus Scherdel, l'avion s'est élancé sur la piste avec ses quatre moteurs électriques alimentés par 17 248 cellules solaires... Ce second et nouveau prototype, alimenté exclusivement par l'énergie de ses cellules solaires, a une envergure de 72 mètres, autant qu'un Airbus A380, mais pour un poids de 2 300 kg, 150 fois moins que l'avion géant d'Airbus. *Solar Impulse 2* doit se lancer en 2015 dans une tentative de tour du monde [...] il devra pouvoir voler plus de cent-vingt heures d'affilée, cinq jours et cinq nuits, le temps dont il a besoin pour traverser le Pacifique ou l'Atlantique. Sans être absolument révolutionnaire sur le plan scientifique, il est équipé de diverses technologies les plus novatrices utilisées dans le but d'économiser du poids. L'aile, par exemple, a été entièrement réalisée en fibres de carbone.

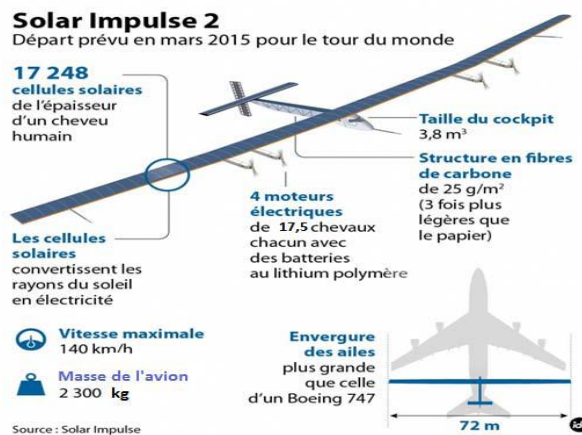


Figure 1.2 : l'avion solaire « Solar Impulse 2 ».

L'aéroplane Solar Impulse 2, à Payerne, en Suisse. Jean Revillard/AP[2]

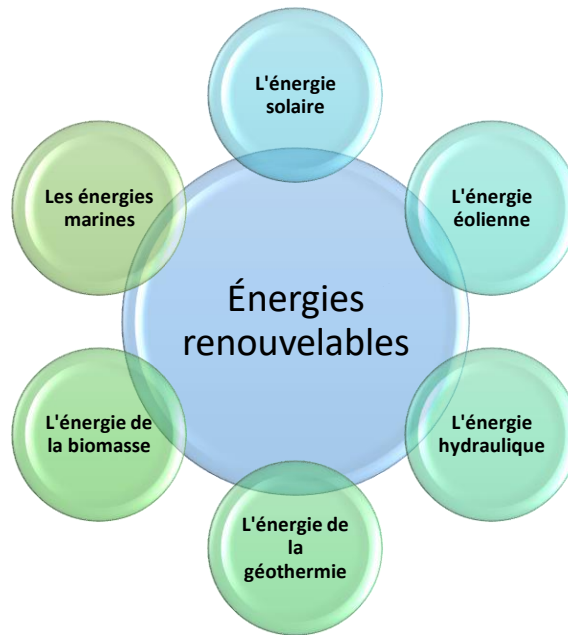
1.2 Production de l'énergie électrique :

La production de l'énergie électrique consiste en la transformation de l'ensemble des énergies renouvelables en énergie électrique.

1.2.1. Des énergies renouvelables :

Les énergies renouvelables (ER) utilisent des flux inépuisables d'énergies d'origine naturelle (soleil, vent, eau, croissance végétale...). Ces énergies de l'avenir ne couvrent pourtant que 22% de la consommation mondiale d'électricité avec l'importance de l'hydroélectricité qui représente les trois quarts de l'électricité issue des ER[03].

Les énergies renouvelables proviennent de deux grandes sources naturelles : le Soleil et la Terre. Surnommées "*énergies propres*" ou "*énergies vertes*", leur exploitation engendre très peu de déchets et d'émissions polluantes mais leur pouvoir énergétique est beaucoup plus faible que celui des énergies non renouvelables.



La figure 1.3 : les six familles de Énergies renouvelables

1 -L'énergie hydraulique :

L'énergie hydraulique est l'énergie mécanique générée par le mouvement de l'eau : chutes, rivières, marées, courants marins, vagues...

2 -L'énergie éolienne :

La force du vent fait tourner des éoliennes qui produisent de l'électricité aux l'avion.

3 -L'énergie solaire :

Les rayons du soleil chauffent l'eau grâce à des capteurs solaires ou fournissent de l'électricité grâce à des cellules photovoltaïques ou des centrales solaires.

4 -L'énergie de la géothermie :

La chaleur du sous-sol chauffe directement l'eau ou fait tourner les turbines des centrales pour produire de l'électricité.

5 -L'énergie de la biomasse :

La combustion de la matière organique (plantes, arbres, déchets animaux, agricoles ou urbains) produit de la chaleur ou de l'électricité.

6 -Les énergies marines :

Énergie marine ou d'énergie des mers désigne l'ensemble des énergies renouvelables extraites ou pouvant l'être du milieu marin .

1.2.2 Différentes sources d'énergie mises en œuvre dans un avion à réaction :

En aviation, comme dans tout type de véhicule, le besoin énergétique auxiliaire est important. Les énergies dites de servitudes sont indispensables car elles permettent d'assurer les performances, la sécurité et le confort.

Tout d'abord, il faut actionner les commandes de vol nécessaires pour diriger l'avion (ailerons, gouvernes...). Pour les avions de taille importante, la seule force de l'homme ne suffit pas pour réaliser ces actions ; une autre source d'énergie est donc indispensable. Ensuite, il y a l'alimentation de tous les équipements électroniques nécessaires à la navigation, et les instruments de contrôle. Enfin, les charges commerciales telles que l'éclairage et les appareils de cuisson requièrent une énergie conséquente. Tous ces systèmes embarqués imposent le recours à différentes natures de sources d'énergie. L'énergie utilisée se présente sous forme hydraulique, électrique et pneumatique. Les moteurs de l'avion alimentent divers équipements permettant de générer ces différentes sources d'énergie, comme indiqué

Fig. 1.4.

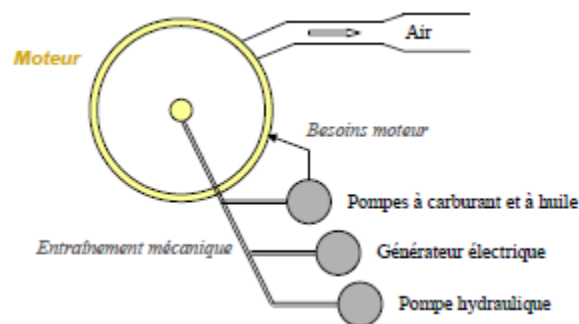


Figure. 1.4 : Différentes sources d'énergie mises en œuvre dans un avion à réaction[02]

Dans le cas des moteurs à réaction actuels, le conditionnement d'air est en partie obtenu par prélèvement d'air sur les étages compresseurs basse et haute pression des réacteurs. Il permet principalement la pressurisation et la climatisation du cockpit et de la cabine.

L'énergie hydraulique est obtenue par une pompe entraînée mécaniquement par le moteur. Elle est utilisée pour actionner les commandes de vol ; elle délivre la puissance nécessaire pour diriger l'avion. Elle permet également la sortie et la rentrée du train d'atterrissage, ainsi que le freinage.

La génération électrique est également obtenue par entraînement mécanique. Un générateur produit l'électricité alimentant de nombreux équipements : calculateurs, instruments de navigation, commandes d'actionneurs, éclairages et diverses charges commerciales. Ainsi, l'électricité est utilisée non seulement pour les systèmes de l'avion, mais aussi pour le confort et le divertissement des passagers. La demande en électricité est en constante augmentation, et la tendance est à son utilisation dans les systèmes de puissance tels que les servocommandes par exemple.

Pourquoi un avion de plus en plus électrique ?

L'électricité offre des avantages certains par rapport à l'hydraulique. La génération, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique sont plus aisées, car elle est plus facilement maîtrisable que l'énergie hydraulique ou pneumatique. De plus, les progrès en électronique de puissance permettent des conversions d'énergie électriques très fiables et très performantes. Les actionneurs électriques actuels associés à leur électronique de puissance offrent une grande souplesse de contrôle.

Outre la simplification de mise en oeuvre obtenue par des systèmes électriques, l'objectif principal reste la réduction de la masse globale de l'avion. La masse est un critère déterminant dans le choix des technologies avionables.

1.3 L'énergie à bord des avions :

1.3.1 Sources primaires d'énergie des avions :

a) Moteurs :

Les principales sources primaires d'énergie d'un avion sont les moteurs. Ils permettent de propulser l'avion (en vol comme au sol). Les moteurs sont des machines complexes, qui peuvent représenter jusqu'à 30% du prix d'achat d'un avion. Ce sont aujourd'hui des turboréacteurs sur les avions civils de taille importante, tels que ceux de la famille Airbus, de l'A320 à l'A380. La poussée est produite par l'éjection de gaz à grande vitesse vers l'arrière.

La technologie, utilisée sur les avions de ligne modernes, est dite à « double flux » (Figure 2) car elle permet le meilleur compromis rendement/bruit/souplesse. Sur ce type de turboréacteur on prélève une partie de l'énergie pour faire tourner une turbine supplémentaire à un ou plusieurs étages qui entraîne un compresseur basse pression. Il y a donc deux types de flux.

Le flux primaire ou flux chaud traverse tout le réacteur en passant par les compresseurs basse pression, et haute pression, les chambres de combustion et les turbines haute pression et basse pression. Le flux secondaire ou flux froid contourne toute la partie chaude du réacteur. Les deux flux se rejoignent et se mélangent dans la tuyère avant d'être éjectés. Sur certains réacteurs, pour favoriser le mélange air secondaire (froid)/air primaire (chaud), un mélangeur est rajouté au début de la tuyère pour produire une dilatation et une accélération du flux secondaire afin d'optimiser la poussée totale.

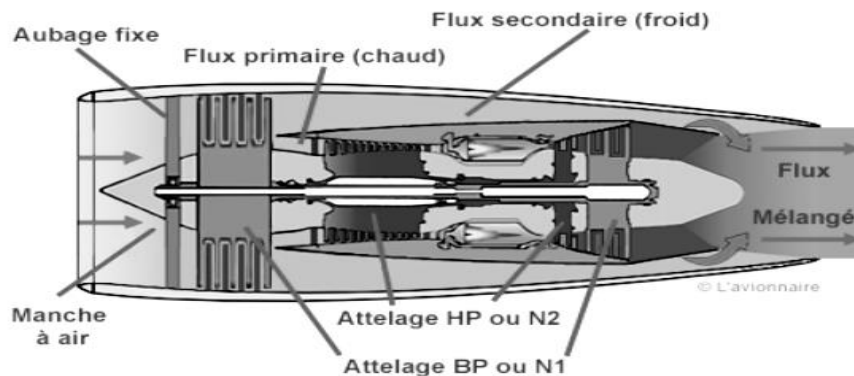


Figure 1.5 : – Turboréacteurs à double flux[2]

Sur des avions de taille moins importante (inférieures à 100 passagers), ne nécessitant pas une vitesse importante (moins de 800 km/h), des turbopropulseurs sont utilisés. Ce type de motorisation à hélice est utilisé pour les ATR42/ATR72 qui sont très populaires pour les trajets court- courriers (moins de 1500 km), grâce notamment à leurs faibles consommations de carburant.

b) Groupe Auxiliaire de Puissance (Auxiliary Power Unit ou APU) :

Lorsque l'avion est au sol et que les moteurs sont éteints, l'alimentation en énergie de l'avion est réalisée par une source auxiliaire de puissance (APU : *Auxiliary Power Unit*).

Cette turbine alimentée en kérosène est installée dans la queue de l'avion (Figure 3). Elle tourne à fréquence fixe et fournit de l'énergie pneumatique et électrique à l'ensemble de l'avion. De plus, l'APU assure le démarrage des moteurs grâce à l'injection d'air comprimé dans les moteurs.



Figure 1.6 – APU en queue d'avion[2]

c/ Ram Air Turbine :

En vol, en cas de perte totale de génération, lorsque tous les moteurs sont perdus par exemple, la RAT (*Ram Air Turbine*) est déployée (Figure 4). Il s'agit d'une éolienne entraînée par le flux d'air créé par l'avion en mouvement. Cette éolienne, déployée sous l'aile de l'avion ou le fuselage, permet d'alimenter les systèmes indispensables (« essentiels ») permettant de ramener l'avion au sol (calculateurs, actionneurs de commande vol, alimentation des instruments du cockpit,...). Depuis l'A380, cette RAT jusqu'ici à puissance hydraulique est passée en puissance électrique.

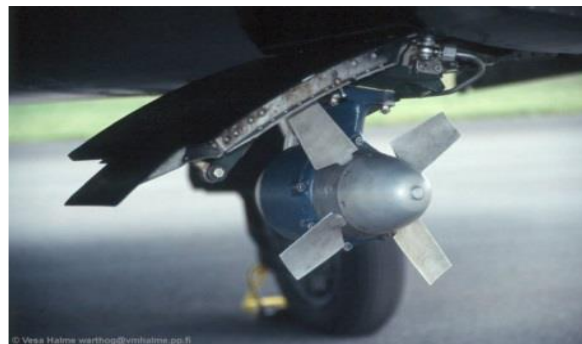


Figure 1.7 – Ram Air Turbine [2]

1.4 Principaux vecteurs énergétiques des avions :

L'analyse des sources de puissance primaire présentées nous apprend qu'il existe 4 vecteurs énergétiques produits dans un avion moderne : mécanique, électrique, hydraulique et pneumatique. Le moteur produit ces 4 vecteurs tandis que l'APU ne produit que de l'énergie électrique et pneumatique. Selon les avions, la RAT fournit de l'énergie hydraulique ou électrique. Pour les moteurs, l'énergie mécanique est directement produite à partir de l'arbre auxiliaire, lui-même mis en mouvement par un engrenage couplé sur l'arbre « haute pression »

du moteur. Les pompes à huile et à carburant sont uniquement mises en mouvement grâce à l'usage du moteur et consomment une puissance peu

élevée par rapport aux autres vecteurs énergétiques. L'énergie électrique et l'énergie hydraulique sont produites respectivement par des générateurs électriques et des pompes hydrauliques entraînés mécaniquement par les moteurs. Ces équipements sont également entraînés par l'arbre auxiliaire du moteur. Quant à l'énergie pneumatique, elle est issue d'un prélèvement d'air chaud comprimé dans les étages intermédiaires du compresseur du moteur. Cet air est prélevé avant toute adjonction d'hydrocarbures, il est donc parfaitement pur et sert en particulier au conditionnement d'air de la cabine. La quantité de puissance prélevée sur les moteurs, pour alimenter les systèmes non 90 propulsifs, représente de 3 à 5 % de la puissance totale produite par les moteurs (plus de 95 % de la puissance des moteurs sert donc à mouvoir l'avion).

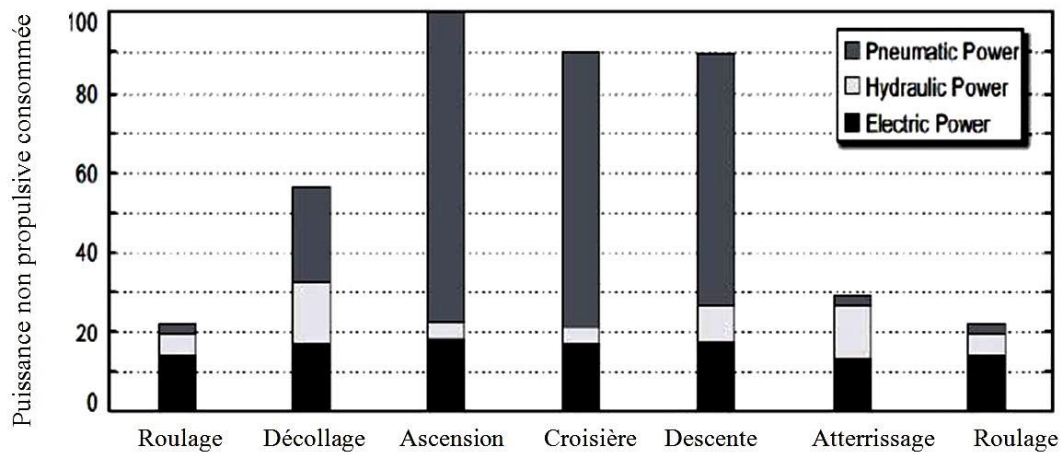


Figure 1.8 – Puissance non propulsive consommée au cours d'un vol[2]

Comme représenté sur la Figure 5, les quantités de puissance prélevées varient selon la forme de puissance et la phase de la mission. Ainsi nous remarquons la prédominance de la puissance pneumatique qui représente jusqu'à 75 % de la puissance prélevée aux moteurs pour certaines phases de la mission (décollage, croisière,...). L'énergie électrique représente moins de 20 % de la puissance des « systèmes » prélevée au niveau des moteurs. Dans la suite de cet exposé, nous présentons un panorama synthétique des principaux systèmes consommateurs d'énergie présents dans des avions dits « conventionnels », (appartenant aux familles Airbus A320 ou A330).

Les systèmes sont classés selon les 3 principaux vecteurs énergétiques.

1.4.1 Systèmes à puissance pneumatique :

Les systèmes les plus énergivores dans un avion sont à puissance pneumatique. L'air comprimé prélevé au niveau des moteurs de l'avion est réparti vers les différents consommateurs par l'intermédiaire du réseau pneumatique (le *Bleed*). Ces consommateurs sont :

- **le système de conditionnement d'air** (*ECS : Environmental Control System*), en charge de maintenir dans l'avion une atmosphère sous des conditions de pression et de température suffisante pour effectuer un voyage en haute-altitude. Ce système complexe est constitué de deux packs de conditionnement d'air alimentés par l'air sous pression issu des moteurs. Les packs produisent de l'air frais à la bonne pression. Cet air est envoyé dans un mélangeur (*Mixer Unit*) afin d'être mélangé avec celui issu des différentes zones pressurisées de l'avion : cabine, cockpit, baie avionique et soute. L'air produit par ce mélange est ensuite réinjecté dans les différentes zones de l'avion.
- **le système d'antigivrage et de dégivrage** (*WIPS : Wing Ice Protection System*), qui permet d'éviter (antigivrage : *anti-ice*) ou d'éliminer (dégivrage : *de-ice*) la formation de glace sur des surfaces telles que les ailes ou l'entrée des moteurs. En effet, l'existence de surfaces givrées peut modifier les profils des ailes augmentant excessivement le poids de l'avion et modifiant ses qualités de vol. Ces changements de caractéristiques peuvent handicaper le pilotage de l'avion.
- **le démarrage des moteurs** (turbopropulseurs), est réalisé à l'aide de l'injection d'air comprimé et chaud prélevé au niveau de l'APU.

1.4.2 Systèmes à puissance hydraulique :

Sur les avions conventionnels (jusqu'à l'A380), trois circuits hydrauliques sont pressurisés par des pompes hydrauliques entraînées mécaniquement par les réacteurs. Pour les avions civils, la pression nominale se situe autour de 200 bars. Ces trois circuits sont classiquement identifiés par un code couleur : *Jaune, Bleu, Vert*. Les différents systèmes hydrauliques sont alimentés par l'intermédiaire d'un réseau complexe de canalisations. Ces consommateurs d'énergie sont principalement des systèmes d'actionnement. En effet, les actionneurs hydrauliques offrent un bon ratio masse/effort et ils sont donc adaptés pour réaliser des fonctions nécessitant des efforts

importants à faible vitesse et sur des temps courts. Un exemple typique est le vérin hydraulique utilisé dans les servocommandes. Ainsi les principaux systèmes hydrauliques sont :

- **le système de commandes de vol** qui est décomposé en 2 sous-systèmes : les commandes de vol principales et les commandes de vols secondaires. Le premier permet de contrôler l'altitude, la trajectoire et la vitesse de l'avion par l'intermédiaire des surfaces mobiles : les spoilers et ailerons (localisés sur les ailes) ainsi que les gouvernes de direction et de profondeur (installées sur le plan vertical/horizontal à l'arrière de l'avion). Ces surfaces contrôlent l'orientation de l'avion selon 3 angles : roulis, tangage et lacet (respectivement en anglais : *roll*, *pitch*, *yaw*). Quant au système secondaire, il contrôle la portance de l'avion grâce à différents dispositifs hypersustentateurs : les becs et volets (en anglais : *slatset flaps*). La Figure 6 montre la répartition des actionneurs du système de commande de vol sur les 3 circuits hydrauliques d'un Airbus A320. L'architecture est dite 3H puisque le système complet est alimenté via 3 circuits hydrauliques indépendants. Le circuit vert est mis sous pression par une pompe directement entraînée par le moteur de gauche. Le circuit jaune est alimenté soit par une pompe électrique alimentée par le réseau électrique, soit par une pompe directement entraînée mécaniquement par le moteur de droite. Quant au circuit bleu, sa mise sous pression est réalisée par une pompe électrique dans les cas normaux, la RAT prenant le relais de l'alimentation du circuit bleu pour les cas de secours (perte des moteurs par exemple).
- **le système de train d'atterrissage** qui réalise les fonctions de : roulage, orientation et freinage de l'avion au sol. Un avion comporte 2 types de trains d'atterrissage. Le train avant (*Nose Landing Gear*), situé sous le nez de l'avion, assure la direction de l'avion lorsqu'il est phase de roulage et de tractage. Le second type, appelé train principal (*Main Landing Gear*), est situé au centre de l'avion. Il supporte le poids de l'avion et assure la fonction de freinage. Pour chacun des 2 types de trains d'atterrissage, un mécanisme de rétractation et d'extension est également nécessaire.

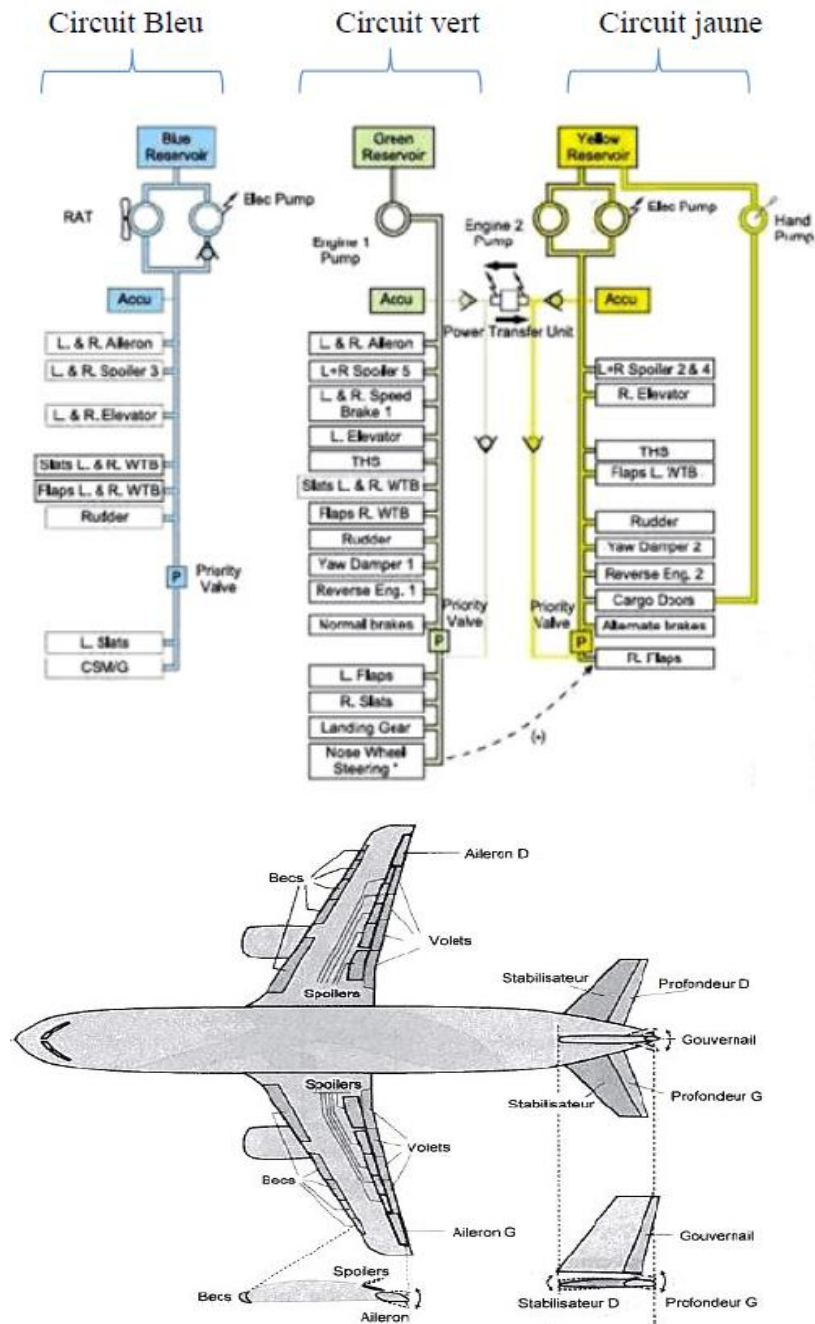


Figure 1.9 – Alimentation des actionneurs de commandes de vol de l'A320 et localisation des surfaces de contrôle pour les commandes de vol de l'A320[9]

1.4.3 Systèmes à puissance électrique :

Par l'intermédiaire des équipements de génération électrique 175 et du réseau de distribution électrique, un nombre important de systèmes électriques sont alimentés. Nous pouvons classer les systèmes électriques selon la criticité de la fonction avion qu'ils mettent en oeuvre. Le niveau de consommation est également un critère de classification. Sur un Airbus A330, il existe près de

700 systèmes électriques, certains consommant quelques W alors que d'autres nécessitent plusieurs kW. Parmi ces derniers nous pouvons citer

- **les pompes à carburant** qui fournissent en premier lieu le kérosène nécessaire pour le fonctionnement des moteurs. Les pompes alimentant directement les moteurs en carburant sont redondées. Mais il existe également d'autres pompes qui sont dites « de transfert ». Ces pompes déplacent le carburant d'un réservoir à un autre afin de contrôler le centrage (maîtrise du centre de gravité) de l'avion. Plusieurs milliers de litres de carburant sont stockés dans les réservoirs placés dans les ailes et sous le fuselage. La capacité de stockage en carburant pour un A380 est de 250 000 litres. Il est donc nécessaire de corriger les niveaux des différents stocks de carburant afin de ne pas déséquilibrer l'avion.
- **les pompes hydrauliques** qui assurent la pressurisation des circuits hydrauliques comme nous l'avons introduit plus tôt.
- **le dégivrage du pare-brise** qui est un système évitant la formation de glace sur les vitres du cockpit. Ce système est important puisqu'il garantit une bonne visibilité aux pilotes de l'avion même pour des conditions givrantes.
- **le système de ventilation** qui fait partie du système de conditionnement d'air est constitué d'un ensemble de ventilateurs. Certains permettent d'extraire l'air chaud et de ventiler pour assurer une température adéquate aux machines présentes dans les compartiments avioniques. D'autres ventilateurs assurent le renouvellement d'air frais.
- **les calculateurs** qui sont les cerveaux des systèmes. Ils sont installés dans la baie avionique à l'avant de l'avion. Sur les avions conventionnels, chaque système avait son ou ses calculateurs dédiés. Sur les nouveaux avions (type A380), la puissance de calcul dispersée sur une multitude de calculateurs est partagée par les systèmes. La consommation d'un seul calculateur n'est pas significative. Cependant l'ensemble des calculateurs embarqués dans un avion consomment plus de 10 kW.
- **les systèmes « cabine »** tels que l'éclairage des sièges passagers, les appareils servant à la préparation des repas ou les écrans de divertissement sont des systèmes consommateurs d'énergie électrique.

1.4.4 L'avion plus électrique : [10]

Le marché aéronautique est aujourd'hui en pleine expansion. Le secteur envisage un accroissement de la flotte à un rythme de 5% par année jusqu'à 2020. Pour répondre à cette tendance, des avions plus performants économiquement et plus sobres écologiquement sont nécessaires. Ainsi, les instances Européennes fixent des objectifs ambitieux afin de réduire les émissions des avions sortant des usines à l'horizon 2020 : 50 % de réduction pour les émissions de CO₂, 80 % pour les NO_x (les oxydes d'azote)[Programme européen ACARE].

Pour répondre à ces nouveaux challenges, des efforts importants de recherche et développement sont aujourd'hui entrepris dans de nombreux domaines de l'aviation :

motorisation, structures composites, profils aérodynamiques, architectures des systèmes. C'est ce dernier domaine qui touche particulièrement le concept d'avion plus électrique. Il est considéré comme un axe de développement majeur pour l'industrie aéronautique. Ce concept vise à remplacer les systèmes hydrauliques et/ou pneumatiques par des systèmes électriques. Les fonctions avion réalisées par les systèmes demeurent les mêmes : conditionnement de l'air, commande de vol,... c'est le type d'énergie les alimentant qui diffère.

Des premières concrétisations de l'avion plus électrique volent déjà. L'A380, dont le premier vol a eu lieu en 2005, se différencie des avions « conventionnels » par un réseau hydraulique constitué par deux circuits hydrauliques au lieu de trois classiquement (le circuit bleu est supprimé). Une partie du système de commande de vol est électrifiée, amenant à une architecture dite 2H/2E : 2 circuits hydrauliques/2 circuits électriques assurent l'alimentation des actionneurs déplaçant les surfaces de contrôle (ailerons, spoilers,...). Cette conception est d'ailleurs conservée sur le nouveau-né de la gamme Airbus : l'A350 XWB.

Une autre illustration de l'avion plus électrique est le Boeing 787. Cet avion ne possède plus de réseau pneumatique : réseau « *Bleedless* ». Les systèmes ECS, WIPS, le démarrage des moteurs sont réalisés de manière totalement électrique. Enfin, le freinage réalisé sur les avions conventionnels par des actionneurs hydrauliques est également électrifié.

Ces deux exemples illustrent les deux axes de l'avion plus électrique : l'avion dit «*Hydraulicless*» consistant à la suppression des systèmes hydrauliques et l'avion dit «*Bleedless*» consistant au remplacement des systèmes pneumatiques.

1.4.5 Avion « Hydraulicless » :

Ce premier axe de l'avion plus électrique consiste à supprimer les réseaux hydrauliques. Du point de vue des consommateurs énergétiques, l'avion « *Hydraulicless* » correspond à électrifier les deux principaux systèmes hydrauliques : les commandes de vol et les trains d'atterrissage. Rendre plus électrique ces systèmes revient à remplacer leurs actionneurs hydrauliques par des actionneurs électriques. Aujourd'hui, 2 types d'actionneurs sont envisagés:

- le concept **Electro Hydrostatic Actuators**(EHA), qui consiste en un vérin hydraulique alimenté par un réseau local mis sous pression par une pompe électrique. Cette dernière est entraînée par un dispositif formé par un moteur synchrone à aimants permanents et un module d'électronique de puissance (onduleur de tension). L'Airbus A380 fut le premier avion à embarquer des EHA permettant ainsi de supprimer un circuit hydraulique. Malheureusement, les EHA possèdent des désavantages inhérents à leur constitution, en particulier en termes de masse, volume et durée de vie.
- le concept **Electro Mechanical Actuator**(EMA), qui est un actionneur purement électrique constitué d'un système vis/écrou (vis à rouleau ou à bille) entraîné par un moteur synchrone à aimants permanents lui-même commandé par un module d'électronique de puissance (onduleur de tension) alimenté par le réseau électrique. Cette solution d'actionnement est plus simple qu'un EHA mais des efforts importants sont aujourd'hui entrepris pour atteindre des niveaux de maturité identiques, voire supérieurs, à l'actionnement hydraulique. Des projets de recherche (Figure 1.10 et Figure 1.11) visent à intégrer ces nouveaux actionneurs dans les systèmes de commande de vol ainsi que pour les systèmes de train d'atterrissage et les roues. Le principal challenge de la technologie EMA est de limiter le risque de blocage (ou grippage) qui est jusqu'ici plus important pour les vérins électromécaniques que pour les vérins hydrauliques.



Figure 1.10 –Roue motorisée pour un roulage plus « vert » (Projet de recherche pour une industrialisation en 2016) [11]

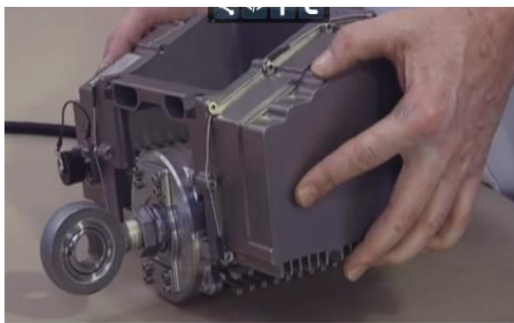


Figure 1.11–Essai d'EMA comme actionneur de commande de vol primaire pour un aileron d'A320 (Projet de recherche) [12]

1.4.6 Avion « Bleedless » :

Le second axe de l'avion plus électrique consiste à électrifier les systèmes de conditionnement d'air (ECS), dégivrage et antigivrage des ailes (WIPS) et le démarrage du moteur. Le prélèvement d'air comprimé (Bleed) sur les moteurs de l'avion ainsi que le réseau pneumatique sont supprimés.

Une solution envisagée pour l'électrification du système ECS est constituée de deux packs de conditionnement d'air à puissance électrique. Chaque pack est constitué de 2 compresseurs électriques consommant une puissance nominale importante (de l'ordre de plusieurs dizaines de kW) et tournant à très haute vitesse. Dans l'avion plus électrique, le système ECS est le plus gros consommateur d'énergie.

Pour l'électrification du système WIPS, deux solutions techniques différentes sont à l'étude :

- *Electrothermique* qui consiste en des tapis chauffés électriquement et qui sont répartis sur le bord d'attaque. Cette solution permet de répondre à la fois aux fonctions antigivrage et dégivrage.
- *Electromécanique* qui est constituée d'actionneurs électromagnétiques produisant des chocs mécaniques afin de décrocher des couches de glace. Cette solution technique ne permet de faire que du dégivrage.

1.4.7 L'avion solaire

Un **avion solaire** est un avion dont la propulsion électrique est alimentée, complètement ou en partie, par de l'énergie qu'il capte du Soleil grâce à des panneaux photovoltaïques. Disposés habituellement sur la surface de l'aile, ils convertissent l'énergie lumineuse de notre étoile en énergie électrique. Connecté aux panneaux, un circuit électronique appelé MPPT assure une utilisation optimale de cette énergie afin d'alimenter le moteur qui transforme cette énergie électrique en énergie mécanique au travers de l'hélice.

Dans la majorité des cas, une batterie est utilisée pour stocker l'énergie supplémentaire afin de pallier un manque de Soleil[13].

Par rapport aux ressources fossiles comme le kérosène, l'énergie solaire est inépuisable, gratuite et non polluante mais présente une variation importante liée à la rotation de la Terre (cycle jour-nuit) et une instabilité imprévisible liée aux nuages. Elle n'est pas utilisée pour les transports aériens. Les cellules photovoltaïques ont un coût élevé, sont fragiles et difficiles à mettre en œuvre sur une aile courbe. En raison de leur rendement maximum situé actuellement à environ 30 %, une surface importante est nécessaire pour obtenir une puissance convenable et les batteries nécessaires au stockage (même issues de la technique de pointe Lithium Polymère) sont lourdes[14]

1.5 Le système photovoltaïque :

Le système photovoltaïque SPV est constitué par un générateur photovoltaïque, les convertisseurs statiques de puissance (DC-DC et DC-AC avec un système de commande) et une charge. Le rôle principal du convertisseur statique est de faire une adaptation d'impédance de sorte que le générateur délivre le maximum d'énergie [10].

1.5.1 L'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque est une forme d'énergie renouvelable qui produit d'énergie électrique par la transformation du rayonnement solaire grâce à une cellule photovoltaïque [11].

La figure (1.12), représente la structure de la chaine de l'énergie solaire photovoltaïque.

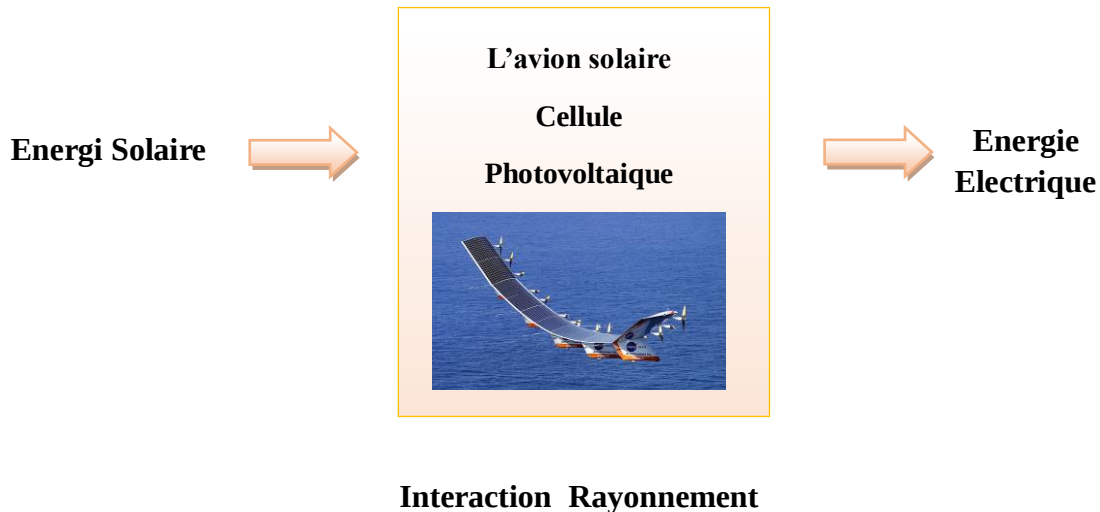


Figure 1.12 : L'énergie solaire photovoltaïque.

1.5.2. Principe de l'énergie solaire photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque Figure 1.13 [52].

1.5.2.1 Gisement solaire :

a) Le rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet à l'infrarouge [12-13], [53]. Pour caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise, on utilise la notion AM pour «Air Mass ».

Dans l'espace hors atmosphère terrestre (AM 0), l'énergie transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre de

1350W/m² (Figure 1.5). En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une diminution et une modification de son spectre dû aux phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz. Sa valeur est de l'ordre de 1000 W/m² au niveau du sol, à 90° d'inclinaison (AM 1).

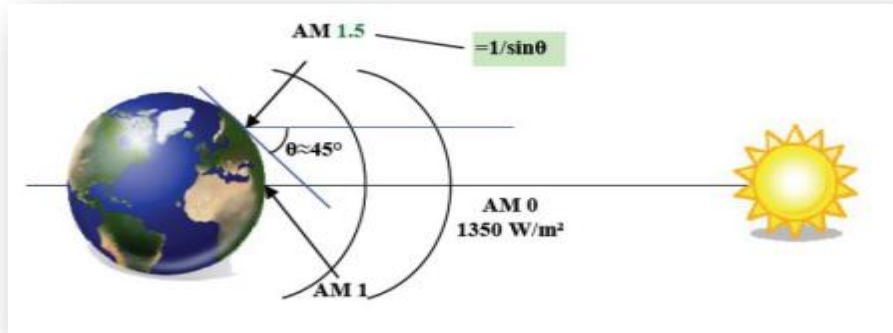


Figure 1.14 : Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM. [14]

b) Spectre du rayonnement :

Le rayonnement électromagnétique (**REM**) est composé de *grains* lumière appelés les ondes des photons. Ces ondes contiennent de l'énergie électrique et magnétique. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ où plus la longueur d'onde courte, et l'énergie du photon est grande comme indique la relation suivante[54]:

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

Où : h est la constante de Planck , c la vitesse de la lumière et λ : la longueur d'onde

Avec :

- $E (J)$: Energie en Joule;
- $h (J.s)$: Constante de Planck ($h= 6,62607004 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg} / \text{s}$) ;
- $c (ms.^{-1})$: Vitesse de la lumière ($c= 299\,792\,458 \text{ m} / \text{s}$) ;
- $\lambda (m)$: Longueur d'onde (souvent exprimée en micromètre) ;
- $\nu (Hz)$: Fréquence.

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement en figure (1.15) :

- -Ultraviolet UV $0.20 < \lambda < 0.38 \text{ mm}$ 6.4%.
- -Visible $0.38 < \lambda < 0.78 \text{ mm}$ 48.0%.
- -Infrarouge IR $0.78 < \lambda < 10 \text{ mm}$ 45.6%.

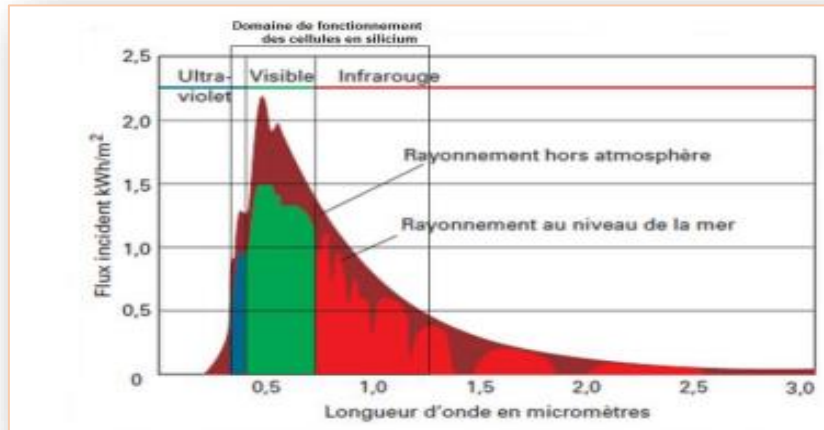


Figure 1.15 : Analyse spectrale du rayonnement solaire.

1.5.3. Les générateurs photovoltaïques :

1.5.3.2. L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque (PV) utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse (Photons) des rayons solaires en électricité, par le biais du déplacement de charges électriques dans un matériau semi-conducteur (Silicium).

Lorsque les photons heurtent une surface mince de ce matériau, ils transfèrent leur énergie aux électrons de la matière. Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique.

Le matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P.

La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique . [16]

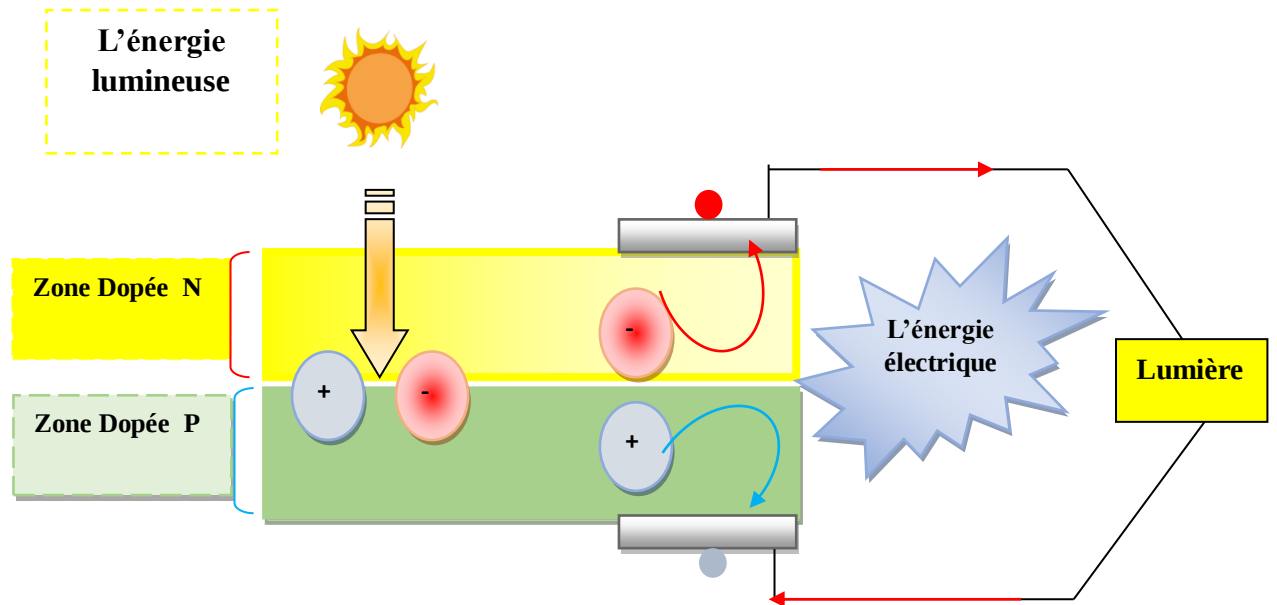


Figure 1.16 : L'effet photovoltaïque.

La figure (1.16), représente un exemple d'un matériau semi-conducteur dopé (Le Silicium).

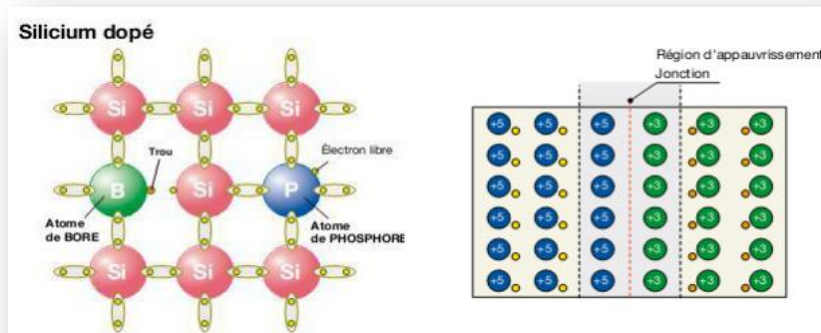


Figure 1.17 :Exemple d'un matériau semi-conducteur dopé (Le Silicium).

C'est ce que l'on appelle le dopage : C'est une technique est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Donc, le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne[17].

1.5.3.2 Principe de fonctionnement de la cellule PV :

A) La cellule photovoltaïque

La cellule PV est le plus petit élément d'une installation photovoltaïque. Elle est composée de matériaux semi-conducteurs de type P-N qui produisent un courant électrique sous l'effet des photons lumineux.

B) Structure et principe de fonctionnement :

La figure (1.9), représente évolution de la taille des cellules silicium photovoltaïques ces dernières années [17].

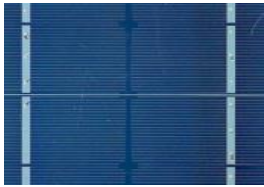
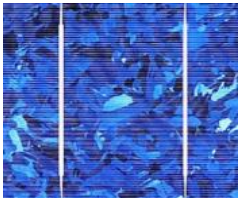
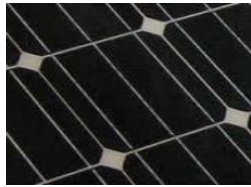


Figure 1.18 : Évolution de la taille des cellules silicium photovoltaïques ces dernières années.

1.5.3.3 Les Différents Types de Cellules Photovoltaïques

Le tableau suivant montre Différent les types des cellules et leurs avantages et inconvénients[18]

Tableau 2 : Différent les types des cellules et leurs avantages et inconvénients

Technologie	siliciumMonocristallines	siliciumPoly-cristallines	siliciumAmorphe
Cellule et Module			
Rendement	14 à 16 %	12 à 14 %	6 à 8 %
Avantages	-Bon rendement -Nombre de fabricants élevé	-Très bon rendement -Moins cher que le monocristallin	-Fonctionnement avec un éclaircissement faible -Un peu moins chère
Inconvénients	-Cout élevé -Rendement plus faible sous un faible éclaircissement	-Rendement faible sous faible éclaircissement	-Rendement faible en plein soleil -Diminution des performances avec le temps
Applications	Appareil de faible puissance. Application spatiale.	Générateurs à toutes tailles (relié au réseau où en sites isolés).	Appareil de faible puissance. Production d'énergie (calculatrices et montres solaires)

1.5.3.4 Générateur photovoltaïque (GPV) :

Contrairement au terme de "panneau solaire" souvent utilisé, l'appellation "générateur photovoltaïque" désigne bien ce dispositif qui permet de produire de l'électricité à partir de la lumière.

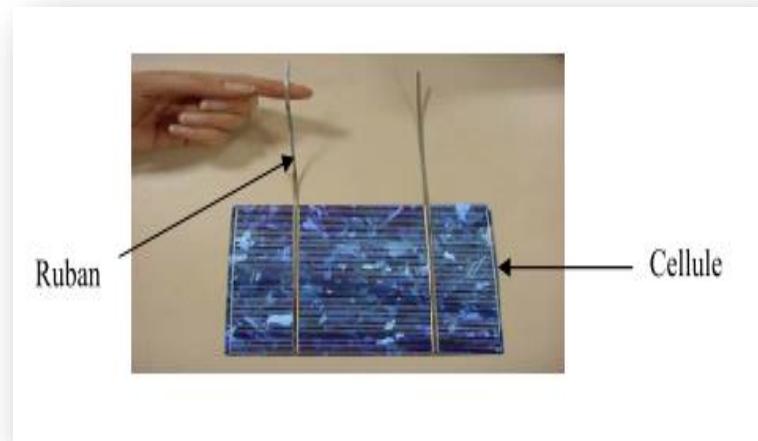


Figure 1.18 :Ruban métallique d'une cellule.

La figure (1.10) , présente ruban métallique d'une cellule. Les cellules sont connectées entre elles par un fins ruban métallique (cuivre étamé), du contact en face avant (-) au contact en face arrière (+)[14]

- Les cellules sont encapsulée sous vide entre 2 films thermoplastiques transparents (EVA : Ethylène Acétate de Vinyle)
- Le plus souvent présence d'un cadre en aluminium avec joint périphérique pour permettre la dilatation . et un verre trempé en face avant protège les cellules sur le plan mécanique tout en laissant passer la lumière . Ensuite la face arrière est constituée d'un verre ou d'une feuille TEDLAR. connexion ; la boîte de connexion étanche regroupe les bornes de raccordement, les diodes by-pass . Les deux câbles unipolaires sont raccordés

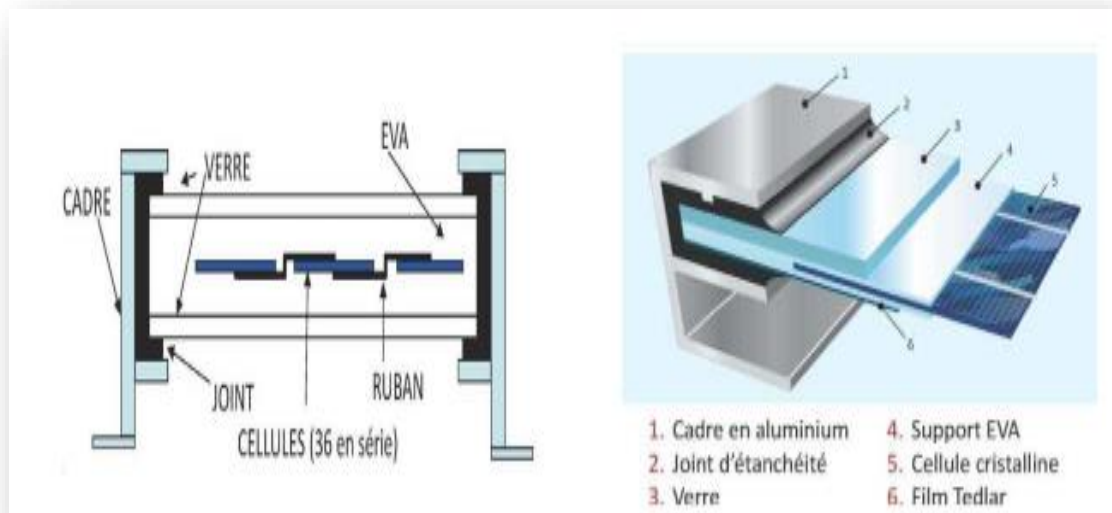


Figure 1.19: Encapsulation des cellules.

Les cellules PV en série ou en parallèle.

Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, pour (N_s) cellules en série, constituant des branches elles-mêmes (N_p) en parallèle.

La puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par relation (1.2) : [14]

$$(1.2) \quad P_{pv} = N_s \cdot V_{pv} \cdot N_p \cdot I_{pv}$$

Avec :

P_{pv} : La puissance disponible en sortie du GPV.

V_{pv} : La tension à la sortie du GPV.

I_{pv} : Le courant de sortie du GPV.

A- Association en série et parallèle d'un module photovoltaïque :**B.1 Association en série**

L'équation (1.3) résume la caractéristique électrique d'une association série de (N_s) cellules[19] .

Le courant-tension de (N_s) cellule série :

$$(1.3) \quad V_{pv} = N_s * V_{co}$$

$$(1.4) \quad I_{pv} = I_{cc}$$

Avec : V_{pv} : La tension générer par le module photovoltaïque de N_s cellules en série.et

I_{pv} : Le courant aux bornes du module photovoltaïque de N_s cellules en série.

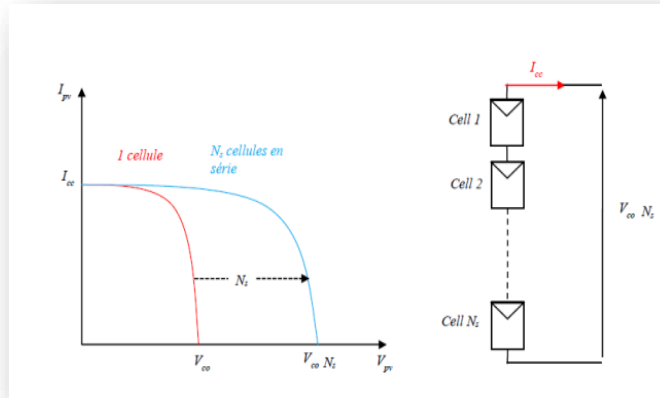


Figure 1.20 : Caractéristique courant-tension de (N_s) cellule série[20] .

B.2 Association en parallèle

L'équation (1.5) résume la caractéristique électrique d'une association parallèle de (N_p) cellules [19]

Le courant-tension de (N_s) cellule parallèle et définir par l'équation suivant:

$$(1.5) \quad V_{pv} = V_{co}$$

$$(1.6) \quad I_{pv} = N_s * I_{sc}$$

Avec :

V_{co} : La tension générer par le module photovoltaïque de Np cellules en parallèle.

I_{pv} : Le courant aux bornes du module photovoltaïque de Np cellules en parallèle.

Une association parallèle de (N_p) cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi crée.

Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants[19] .

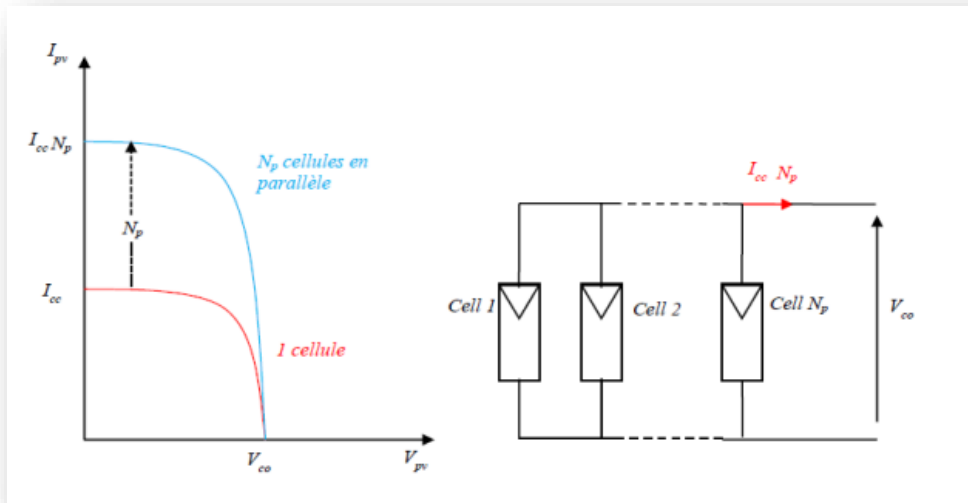


Figure 1.21 : Caractéristique courant tension de (N_p) cellule parallèle [20] .

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairage, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc.), le courant électrique disponible aux bornes d'une cellule photovoltaïque figure (1.14). Le caractéristique $I=f(U)$ d'une cellule photovoltaïque, sur cette courbe, on repère :

- Le point de fonctionnement à vide ou de circuit ouvert ($U_{CO}= U_v$) : U_v pour $I = 0 A$
- Le point de fonctionnement en court-circuit : I_{cc} pour $U = 0V$

a. Caractéristiques puissance / tension

La puissance délivrée par la cellule a pour expression ($P = U.I$) Pour chaque point de la courbe précédente, on peut calculer la puissance P et tracer la courbe ($P = f(U)$). Cette courbe a l'allure suivante :

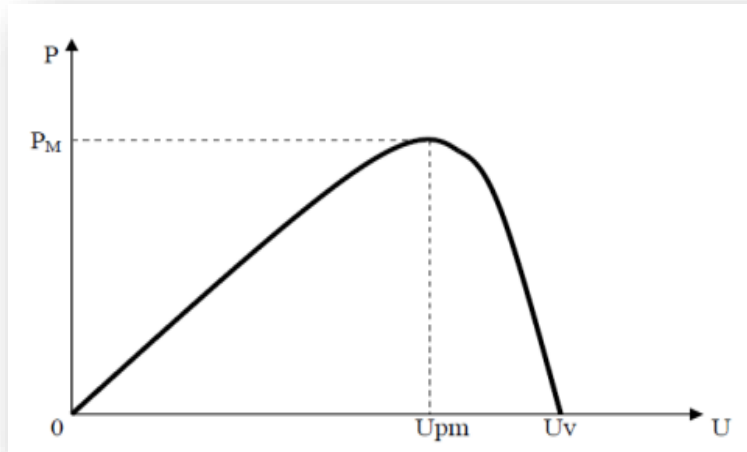


Figure 1.22 : Caractéristique de puissance en fonction de la tension $P=f(U)$ d'une cellule photovoltaïque [21]

La figure (1.15), représente le caractéristique $P=f(U)$ d'une cellule photovoltaïque, sur cette courbe passe par un maximum de puissance (P_m). A cette puissance correspond, une tension U_{pm} et un courant I_{pm} que l'on peut aussi repérer sur la courbe $I = f(U)$ [22].

Pour une cellule solaire idéale, la puissance maximum idéale P_i correspondrait donc à la tension de circuit ouvert ($U_{CO}= U_v$) multipliée par le courant de court-circuit I_{CC} (figure 1.14):

$$(1. 7) \quad P = P_{max\text{ideale}} = U_{CO} \cdot I_{CC}$$

Un générateur photovoltaïque GPV élémentaire décrit par les paramètres suivants[23]:

- **La puissance de crête P_c :**

Puissance nominale délivrée par le module dans les conditions standards (25 °C et un éclairement de 1000 W/m²). Elle s'exprime en Watt crête (Wc).

- **La caractéristique $I(V)$:**

Courbe représente le courant I débit par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.

- **La tension à vide Voc :**

Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairement « plein soleil ».

- **Le courant de court-circuit Isc:**

Courant dériver par un module en court-circuit pour un éclairement « plein soleil ».

- **Le point de fonctionnement optimum (point de puissance maximale) :**

Il est en fonction de l'insolation. C'est le point pour lequel le module fournit son maximum du courant I_{mpp} sous sa tension maximale V_{mpp} (lorsque la puissance de crête est maximale en plein soleil :

$$(1.8) \quad P_{mpp} = V_{mpp} * I_{mpp}$$

- **Le rendement :**

c'est le rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente ; Le rendement énergétique est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale produite P_{mpp} et la puissance du rayonnement solaire parvenant au module. Soit (S) la surface du module et (G) l'éclairement, ce rendement a pour expression :

$$(1.9) \quad \mu = \frac{P_{mpp}}{G * S}$$

- **le facteur de forme :**

c'est le rapport entre la puissance optimale (P_{mpp}) et la puissance maximale que peut avoir le module.

$$(1.10) \quad FF = \frac{P_{mpp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}} = \frac{V_{mpp} \cdot I_{mpp}}{V_{oc} \cdot I_{sc}}$$

1.5.4. Protection D'un GPV :

Deux types de protections sont classiquement utilisés dans les installations actuelles (figure 1.16):

1. La protection en cas de connexion en parallèle de modules PV pour éviter les courants négatifs dans les GPV (Diode Anti-Retour)
2. La protection lors de la mise en série de modules PV permettant de ne pas perdre la totalité de la chaîne (Diode By-Pass) et éviter les points chauds.

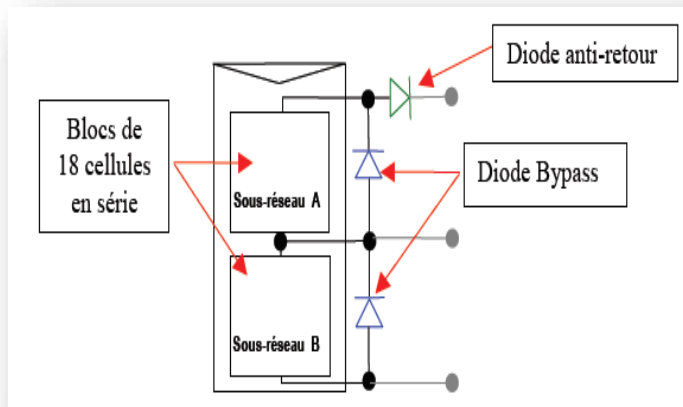


Figure 1.23 : Schématisation d'un GPV élémentaire avec Diodes By-Pass et Diode Anti-Retour[23]

1.6 Conclusion

L'avion plus électrique est déjà une réalité. Aujourd'hui, il est considéré comme un moyen d'augmenter la rentabilité des avions commerciaux et de répondre aux exigences environnementales actuelles et futures, grâce aux gains et améliorations suivants :

- une meilleure rationalisation de la puissance prélevée au niveau des moteurs. En effet, une gestion efficace de l'énergie à bord est plus simple à mettre en oeuvre avec un avion comportant un seul vecteur énergétique qu'avec un avion en possédant plusieurs.
- des gains de masse sont attendus, d'une part en supprimant les lourds réseaux pneumatiques et hydrauliques, d'autre part en tablant sur une diminution des masses des systèmes électriques nouvellement embarqués. En effet, les progrès déjà réalisés sur des machines et des dispositifs de commande à base d'électronique de puissance laissent présager des améliorations supplémentaires dans le futur. Cette technologie est, dans le domaine aéronautique, plus récente que l'hydraulique, et possède donc des marges de progression techniques et technologiques conséquentes.
- des gains de disponibilité au niveau avion et une réduction des coûts de maintenance, grâce à une détection plus facile des pannes des systèmes électriques et à la capacité du réseau électrique à se reconfigurer en comparaison avec les réseaux hydrauliques et pneumatiques.

Pourrons-nous aller plus loin, vers un avion tout électrique, sachant que l'énergie consommée par l'A380 durant une heure de vol en palier est de 86 400 MJ ?

Chapitre 2 :

**Etude théorique des convertisseurs
statique et leur modelé de conception
étudie**

II. Chapitre 2 : Etude théorique des convertisseurs statique et leur modelé de conception étudié :

1. Introduction:

Actuellement, l'énergie électrique est essentiellement produite et distribuée sous forme alternative, par contre, beaucoup d'applications nécessitent des formes différentes de cette énergie. Dans ce cas, il faut prévoir un dispositif qui permet la transformation de l'énergie disponible. Au départ, la conversion de l'énergie électrique a été effectuée à l'aide de groupes de machines tournantes, mais ce procédé est actuellement presque entièrement délaissé au profit de dispositifs électroniques, appelés convertisseurs statiques des puissances.

L'électronique de puissance est l'une des sciences qui traite la conversion statique de l'énergie électrique. C'est la partie de l'électronique spécialisée dans le changement de forme des tensions et des courants électriques associés à l'aspect énergétique des circuits électriques. Cette science ayant le souci de travailler à rendement maximum.

Ce chapitre est consacré à une présentation générale de deux montages de la conversion de l'énergie électrique :

- La modification de la valeur efficace d'une tension alternative (à l'aide des transformateurs).
- La transformation de l'énergie électrique alternative en énergie électrique continue (montages redresseurs).

2 . Le réseau de bord de l'avion plus électrique :

Le réseau de bord électrique d'un avion a pour objectif fonctionnel de fournir de l'énergie électrique aux systèmes de l'avion. Il a 4 fonctions principales(1)

- *F1 : Générer la puissance électrique*
- *F2 : Adapter les niveaux de tension*
- *F3 : Distribuer la puissance électrique*
- *F4 : Gérer les charges électriques*

Voyons comment ces fonctions sont réalisées.

2.1 Fonction F1 : Générer la puissance électrique :

La fonction *Générer la puissance électrique* est réalisée par 4 sous-fonctions qui sont mises en oeuvre par des équipements dédiés. Leur utilisation dépend des phases de la mission dans laquelle se trouve l'avion et de l'état des équipements (cas de pannes).

• Fonction F1.1 : *Générer la puissance électrique à partir des moteurs*

La génération de puissance électrique est principalement réalisée par des générateurs couplés mécaniquement aux moteurs. Lorsque les moteurs sont allumés (au sol ou en vol), ce sont ces générateurs, que nous qualifierons de « principaux », qui alimentent en priorité l'avion en énergie électrique. Sur les avions de la gamme Airbus, il existe deux types de générateurs principaux :

- l'*Integrated Driven Generator* fournit une tension triphasée de 115/200 VAC (tension efficace entre phase et neutre/ tension efficace entre phases) à une fréquence fixe de 400 Hz. Il est constitué d'une machine synchrone à rotor bobiné entraîné à fréquence fixe par un dispositif hydromécanique (CSD : Constant Speed Drive) régulant la vitesse de l'arbre entraîné par le moteur de l'avion tournant à des fréquences variables selon la phase de la mission. Ces générateurs sont notamment embarqués sur la famille A320, A330, A340.
- o le *Variable Frequency Generator*(VFG) est aussi une machine synchrone à rotor bobiné pour laquelle le CSD a été supprimé. La suppression de ce régulateur hydromécanique permet de réduire la masse et d'augmenter la fiabilité de la machine. En contrepartie, la génération d'une tension à fréquence variable (un VFG produit une tension triphasée à fréquence variable allant de 370 à 770 Hz) ajoute des contraintes électriques sur les charges alimentées (comme certains moteurs alternatifs dont la vitesse de rotation est liée à la fréquence des tensions d'alimentation). Ce type de générateur a été introduit à partir de l'A380. Selon les avions, la tension produite est de 115/200 VAC (pour l'A380 et l'A400M) ou de 230/400 VAC (pour l'A350).

• Fonction F1.2 : *Générer la puissance électrique à partir de l'APU*

Lorsque l'avion est au sol et que les moteurs ne sont pas allumés, l'alimentation en énergie de l'avion est réalisée par la source auxiliaire de puissance appelée *Auxiliary Power Unit* (APU). Selon l'avion considéré, un ou plusieurs générateurs électriques sont entraînés par l'APU. Il s'agit de générateurs à rotor bobiné produisant une tension triphasée à fréquence fixe de

400Hz. Les niveaux produits sont de 115/200 VAC (pour l'A380 et l'A400M) et de 230/400 VAC (pour l'A350).

• **Fonction F1.3 : Générer la puissance électrique en situation d'urgence**

Lorsque l'avion est en vol et qu'aucun générateur principal ni aucun générateur de l'APU n'est disponible, un troisième type est utilisé : le générateur d'urgence. Cette machine, entraînée par la RAT, alimente une partie limitée du réseau électrique. A partir de l'A380, la RAT devient électrique.

• **Fonction F1.4 : Générer la puissance électrique pour une durée déterminée**

Un quatrième type d'équipement embarqué dans l'avion produit de l'énergie électrique : les batteries. Ayant une capacité énergétique limitée (180 Wh/Kg pour la technologie Lithium/ion) et fournissant une tension de 28VDC, elles sont principalement utilisées pour des actions très limitées dans le temps. Les cellules des batteries embarquées dans les avions sont principalement de type Cadmium/Nickel, tandis que de nouvelles technologies (Lithium/Ion) devraient peu à peu embarquer sur les nouvelles générations d'aéronefs.

2.2. . Fonction F2 : Adapter les niveaux de tension :

Dans les avions conventionnels, il n'existe que 2 niveaux de tension : 115/200 VAC et 28VDC. Pour les avions plus électriques, afin de limiter le diamètre des câbles, des niveaux de tension plus élevés sont ajoutés : 230/400 VAC et ± 270 VDC. On dénomme ces niveaux de tension de la manière suivante :

- Tension triphasée 115/200 VAC par tension « AC » ;
- Tension triphasée 230/400 VAC par tension « HVAC » (pour *High Voltage AC*) ;
- Tension continue 28 VDC par tension « DC »;
- Tension continue ± 270 VDC par tension « HVDC » (pour *High Voltage DC*).

Des convertisseurs doivent permettre d'adapter le type et le niveau de tension de la source en fonction de la charge. Les différentes fonctions à réaliser sont (**Figure 9**) :

- **Fonction F2.1 : Convertir une tension AC ou HVAC en une tension DC**
- **Fonction F2.2 : Convertir une tension HVAC en une tension AC(bidirectionnelle)**
- **Fonction F2.3 : Convertir une tension HVAC en une tension HVDC**
- **Fonction F2.4 : Convertir une tension HVDC en une tension DC(bidirectionnelle)**

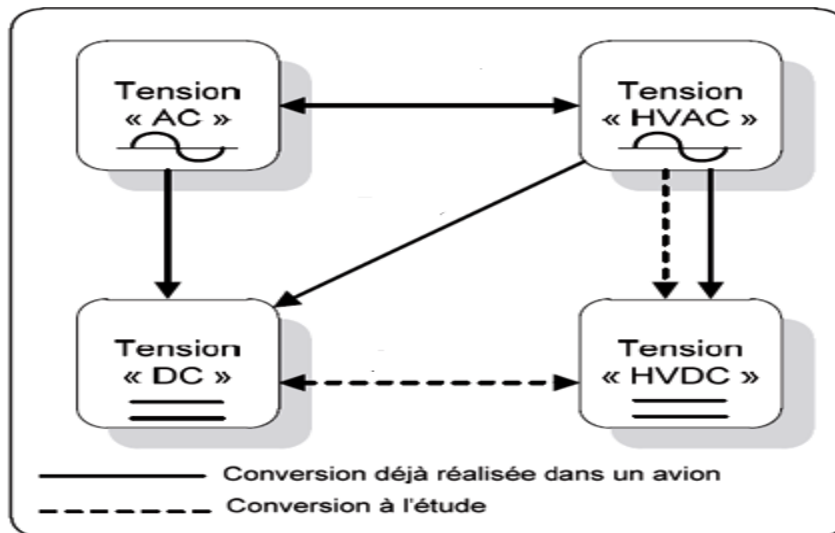


Figure 2.1 –Conversions électriques dans le réseau de bord avion

2.3 Fonction F3 : Distribuer la puissance électrique

Une fois la puissance électrique générée avec les niveaux de tension 370 adéquats, l'électricité doit être distribuée aux consommateurs c'est-à-dire aux charges électriques. La fonction *Distribuer la puissance électrique* est principalement réalisée par un équipement appelé cœur électrique de distribution. Le coeur joue le rôle d'aiguilleur de puissances entre les équipements générateurs, batteries, convertisseurs et les charges électriques. C'est un meuble électrique dans lequel des barres, des contacteurs et des protections électriques sont installés.

Les fonctions de ce coeur sont au nombre de 3 :

- **Fonction F3.1 : Transporter la puissance électrique**
- **Fonction F3.2 : Connecter les charges au réseau**

- **Fonction F3.3 : Configurer le réseau**

2.4 Fonction F4 : Gérer les charges

La gestion des charges consiste en :

- **Fonction F4.1 : Protéger le réseau électrique**

Comme dans toute installation électrique, des protections doivent être installées afin de pallier aux différents défauts électriques. A cet effet, des protections contre les surintensités sont installées dans le coeur électrique.

- **Fonction F4.2 : Connecter/390 Déconnecter les charges**

Cette fonction permet de gérer les charges du réseau de manière précise en décidant d'alimenter un système au détriment d'un autre afin d'optimiser l'équilibre production consommation.

3. Les convertisseurs statiques des puissances :

Un convertisseur statique est un dispositif, à base de semi-conducteurs, qui transforme de l'énergie électrique disponible, en une forme appropriée pour alimenter une charge [33].

On distingue deux types de sources de tension :

- 1- Sources de tension continues caractérisées par la valeur V de la tension.
- 2- Sources de tension alternatives définies par les valeurs V de la tension efficace et les valeurs f de la fréquence.

3.1 Fonctions de base et terminologie des convertisseurs statiques :

L'énergie électrique est disponible soit sous forme alternative (réseau de distribution électrique, alternateurs) soit sous forme continue (batterie d'accumulateurs, génératrice à courant continu, cellules photovoltaïques, pile à combustible, ...). La charge peut nécessiter une alimentation en alternatif ou en continu.

- **Types des convertisseurs statiques:** Il existe deux types des convertisseurs statiques sont réversible et non réversible [34] :

- a) **Un convertisseur statique est dit réversible(CR)** lorsque l'énergie, peut transiter (en général, être contrôlée) de manière bidirectionnelle, c'est à dire aussi bien dans un sens que dans l'autre.
- b) **Un convertisseur non réversible(CNR)** transfère l'énergie d'une source vers une charge utilisatrice.

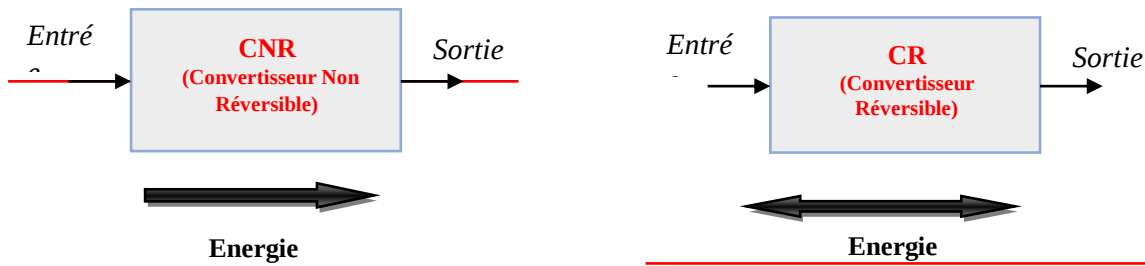


Figure 2.2 : Réversibilité et non réversibilité des convertisseurs statiques(34)

Les convertisseurs statiques utilisent des composants jouant le rôle d'interrupteurs électroniques (Ouverts ou Fermés) selon un principe de découpage complété par des circuits passifs de filtrage [35].

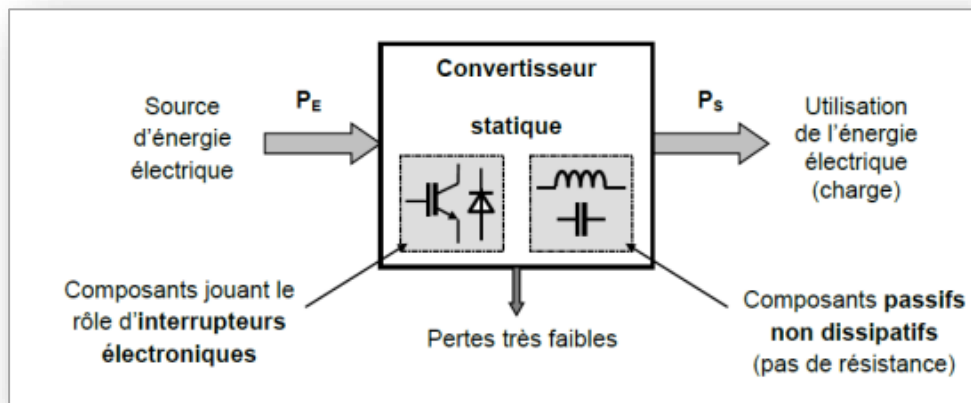


Figure 2.3 : Architecture générique d'un convertisseur statique (35)

Modélisation des Convertisseurs

Un convertisseur d'énergie est un équipement que l'on dispose généralement soit entre le champ photovoltaïque et la charge pour une charge continu (sans stockage avec une charge en continu, il portera le nom de convertisseur continu), soit entre la batterie et la charge (après stockage, il sera appelé onduleur ou convertisseur continu-alternatif) (36)

Les convertisseurs statiques sont des circuits électriques utilisant des semi-conducteurs de puissance (diodes, thyristors, transistors ...) utilisés comme des interrupteurs, dans le but de transformer le spectre du signal (amplitudes, fréquences, phases) pour adapter la source à la charge.

- **Les fonctions des convertisseurs statiques:**

Le convertisseur statique remplit les fonctions suivantes :

- Conversion de courant continu en courant alternatif compatible avec la tension du réseau.
- Optimisation de la tension continue de manière à ce que le champ de modules fonctionne dans des conditions de puissance optimales.
- Sécurité.

3.1.1 Les différents convertisseurs

Dans le domaine de l'électronique de puissance, il existe plusieurs types de convertisseurs, selon le besoin d'utilisation, parmi cela on trouve (37) :

- 1- Les convertisseurs Alternatif/Alternatif ($AC \Rightarrow AC$), exemple : **Gradateur.**
- 2- Les convertisseurs Continue/Continue ($DC \Rightarrow DC$), exemple : **Hacheur.**
- 3- Les convertisseurs Continue/Alternatif ($DC \Rightarrow AC$), exemple: **Onduleur.**
- 4- Les convertisseurs Continue/Alternatif ($AC \Rightarrow DC$), exemple : **Redresseur.**

La figure (2.4), représente les différents types de convertisseurs statiques dans le domaine d'électronique de puissance.

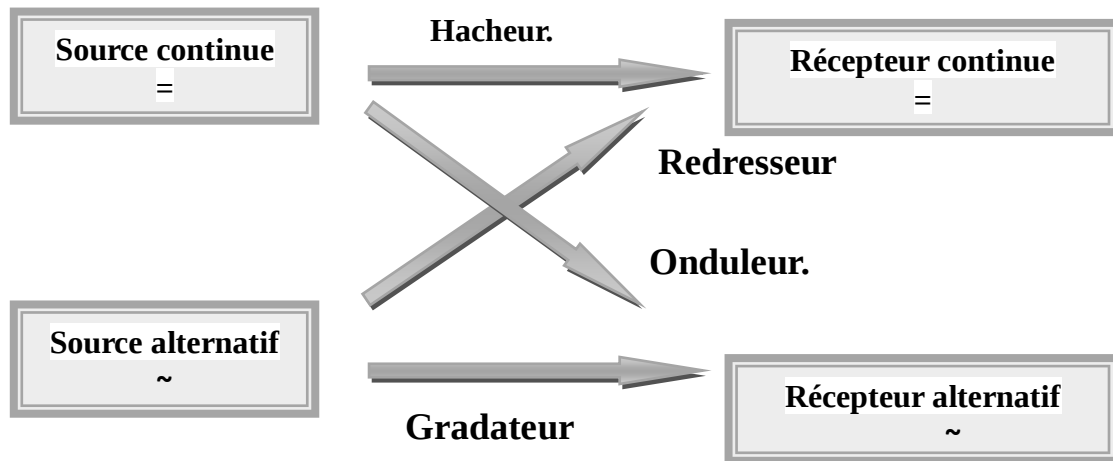


Figure 2.4 : les différents types de convertisseurs statiques(37)

3.1.1.1 Convertisseurs continus-continus (DC/DC) ou Les Hacheurs :

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau photovoltaïque PV) à la charge qui demande en général une tension du DC constante.



Figure 2.5: Symbole d'un convertisseur DC-DC.

Dans l'étude des convertisseurs DC-DC, nous distinguerons systématiquement l'alimentation (Source génératrice d'énergie) de la charge du convertisseur (source réceptrice).

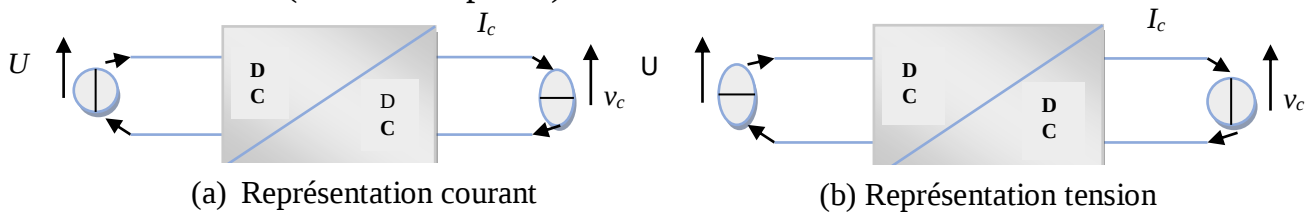


Figure 2.6 : Convertisseur DC/DC

Les différents types des convertisseurs hacheurs :

- **Hacheur dévolteur (Buck ou série) :** la tension moyenne délivrée en sortie est inférieure à celle appliquée en entrée.
- **Hacheur survolteur (Boost ou parallèle) :** la tension moyenne délivrée en sortie est supérieure à celle appliquée en entrée.
- **Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost ou série-parallèle) :**
- ce sont des hacheurs capables de fonctionner de deux manières (Buck –Boost) ou la tension moyenne de sortie est inférieure ou supérieure à celle de l'entrée.

Dans notre étude, le convertisseur Boost est utilisé comme adaptateur de la charge, permettant la du point de puissance maximale(40)

3.1.1.2 Composition du convertisseur [41]

a) Le transistor

Définition : Un transistor est un interrupteur commandé à deux segments de même signe.

Exemples : On retrouve plusieurs technologies des transistors sont

- Le transistor MOSFET (Metal Oxyde Semi-conducteur Field Effet Transistor), enrichi à grille isolée est utilisé en électronique de puissance pour alimenter des charges en commutation(40)
- Le transistor IGBT bipolaire à grille isolée (Insulated Gate Bipolar transistor).

Ce sont tous deux des composants unidirectionnels en tension et en courant(37)

La figure (2.7) , repente type de transistor est caractérisé par la charge de ses porteurs majoritaires qui détermine s'il est de type P ou N.

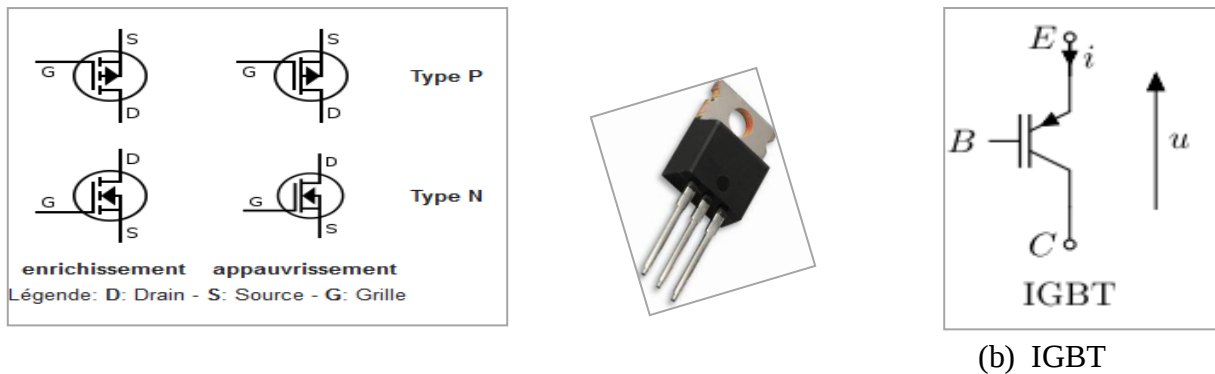


Figure 2.7 : Représentation symbolique et notation
Pour le MOSFET et IGBT

b) Le condensateur

Définition : Le condensateur est un composant électronique élémentaire, constitué de deux armatures conductrices appelées « *électrodes* » en influence totale et séparées par un isolant polarisable (ou « *diélectrique* »). La capacité d'un condensateur est égale au rapport de la charge électrique Q emmagasinée à la tension V appliquée entre ses armatures [37].

$$(2.12) \quad C(F) = \frac{Q(C)}{V(V)}$$

Dans le cas simplifié d'un condensateur dont la surface S des armatures en regard est plane, l'expression de la capacité est [41]:

$$(2.13) \quad C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 S}{e}$$

Avec :

ϵ_0 : Permittivité du vide.

ϵ : Permittivité relative (2 à 20000) du diélectrique.

e : Epaisseur du diélectrique .

c) L'inductance [10]

Définition : L'inductance est un composant électronique élémentaire, joue un rôle pour stocker une énergie électrique sous forme magnétique, puis de la restituer. On peut naturellement réaliser des bobinages à air.

Le schéma électrique équivalent d'une inductance réelle L est le suivant :

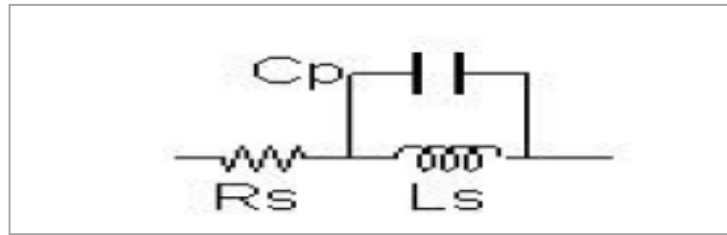


Figure 2.8 : Schéma équivalent d'une inductance réelle L

Où s représente la résistance série du fil bobiné et Cp les capacités parasites inter spires.

La valeur de l'inductance est obtenue par (40) :

$$L = \mu_0 \mu_e \frac{s_e}{l_e} N^2 \quad (2.14)$$

Avec :

μ_0 : constants $4 \pi \cdot 10^{-7}$ (SI)

μ_e : Perméabilité relative (y compris entre fer éventuel)

s_e : Section effective magnétique du noyau (section moyenne)

l_e : Longueur magnétique effective (longueur moyenne du circuit magnétique).

N : Nombre de spires.

d) La diode Schottky

La diode Schottky présente deux avantages par rapport aux diodes classiques [10], [14] :

- Caractéristique électrique : tension de blocage de 600 V.
- Tension de seuil plus faible ($V_s = 0,3V$).
- Les diodes Schottky ont des temps de recouvrement inverse très courts (Tr de 0,15 à 0,35 μs).

Les diodes Schottky sont utilisées en basse tension dans les circuits nécessitant une grande vitesse de commutation, par exemple dans les

montages hacheurs à haute fréquence que l'on rencontre dans les alimentations à découpage(39)

3.1.1.3 Convertisseur Boost

Un convertisseur Boost, (ou hacheur parallèle), est une alimentation à découpage permettant d'augmenter la tension fournie et diminuer ainsi, le nombre d'éléments nécessaires pour atteindre le niveau de tension désiré [40]. Donc les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur Boost pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur [38].

a) Schéma du convertisseur Boost

Le convertisseur Boost est le plus populaire des convertisseurs pour les régulateurs de correction du facteur de puissance, il est caractérisé par le fait que la tension de sortie est supérieure à la tension d'entrée.

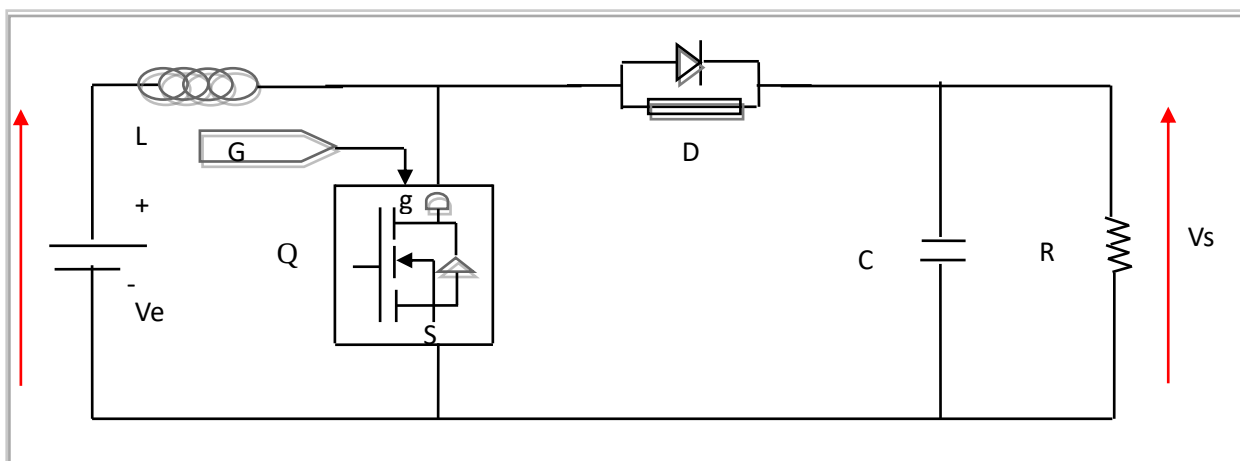


Figure 2.9 : Schéma de convertisseur Boost.

b) Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'un convertisseur Boost peut être divisé en deux modes sont :

- **Mode continu** : (Une phase d'accumulation d'énergie) :

Lorsque de l'état passant du l'interrupteur Q est fermé ($Q=1$) : La diode D est alors bloquée et la charge est alors déconnectée de l'alimentation.

- **Mode discontinu** :

Lorsque l'interrupteur Q est ouvert, l'inductance se trouve alors en série avec le générateur et sa f.é.m. s'additionne à celle du générateur (effet survolteur). Le

courant traversant l'inductance traverse ensuite la diode, le condensateur et la charge. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité (41)

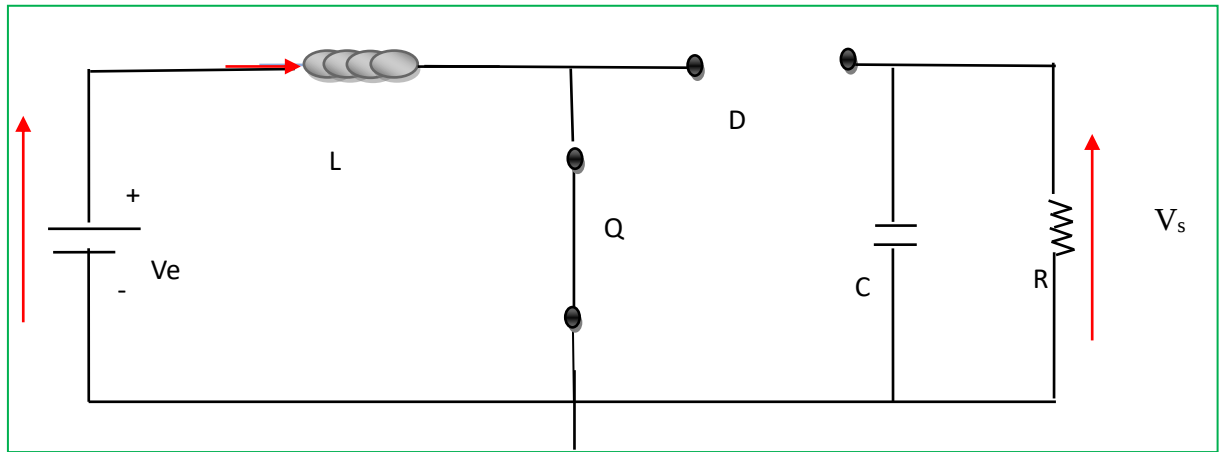


Figure 2.10 : Schéma électrique d'un hacheur Boost fermé.

Le fonctionnement du circuit peut se diviser en deux parties selon l'intervalle de commutation (T_{On} , T_{Off}).

A) Pour T_{On} (Q fermé) : À $t = 0$, quand le transistor Q est fermé, l'intervalle T_{On} commence. Le courant d'entrée, qui s'élève, traverse l'inductance L et le transistor.

La figure (2.10) représente formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Boost.

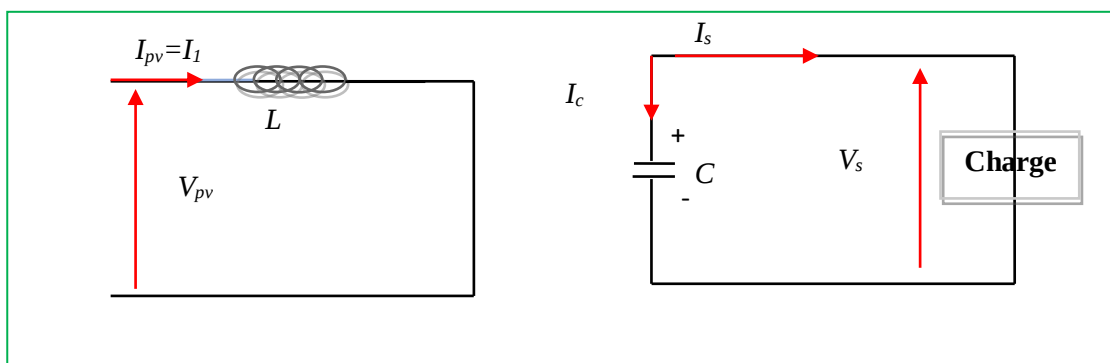


Figure 2.11 : Circuit équivalent pour T_{on} .

a.1) L'équation de la tension : Durant l'état passant, l'interrupteur Q est fermé, entraînant l'augmentation du courant suivant la relation :

$$V_e = L \frac{di}{dt} \quad (2.15)$$

Avec :

$$V_e = V_{pv} \quad (2.16)$$

a.2) L'équation du courant : à la fin de l'état passant, le courant i_{1L} a augmenté selon l'équation (2.17):

$$i_{1L} = \int \frac{V_e}{L} dt \quad (2.17)$$

$$i_{1L} = \frac{\alpha V_e}{L} t \quad (2.18)$$

Où i_{1L} est le courant à l'instant initial.

B) Pour T_{off} (Q ouvert) : l'intervalle T_{off} commence quand on ouvre le transistor Q à $t = t_1$.

Le courant de l'inductance diminue car l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est transférée à la charge.

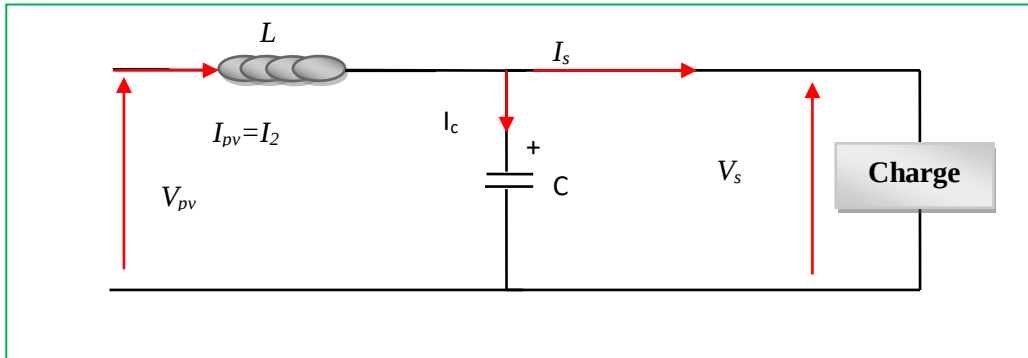


Figure 2.12 : Circuit équivalent pour T_{off} .

b.1) L'équation de la tension : Pendant l'état bloqué, l'interrupteur Q est ouvert, le courant traversant l'inductance circule à travers la charge.

$$V_e - V_s = L \frac{di}{dt} \quad (2.19)$$

b.1) L'équation du courant : à la fin de l'état passant, le courant i_{2L} a augmenté selon l'équation (2.20):

$$i_{2L} = \int \frac{V_e - V_s}{L} dt \quad (2.20)$$

$$i_{2L} = \frac{(\alpha - 1)(V_e - V_s)}{L} t \quad (2.21)$$

Où i_{2L} est le courant à l'instant initial.

La figure (2.13) , représente forme du courant i_1 et i_2 :

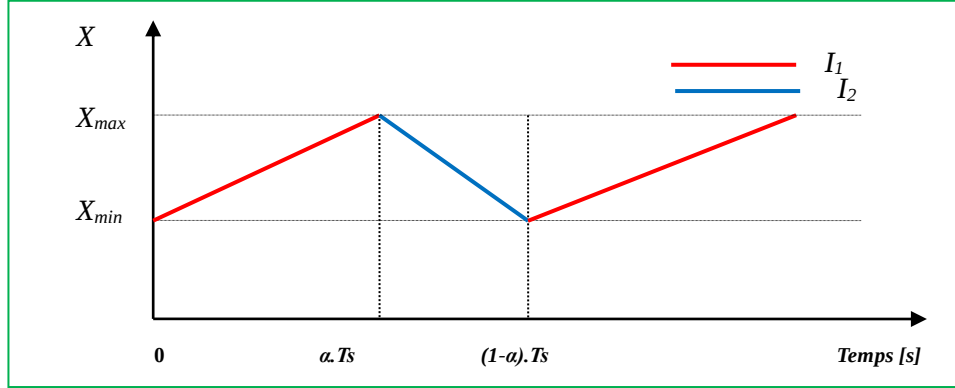


Figure 2.13: Forme du courant i_1 et i_2

L'énergie stockée dans l'inductance est donnée par :

$$E = \frac{1}{2} Li^2 \quad (2.22)$$

La variation du courant traversant l'inductance est :

$$i_{on} + i_{off} = 0 \quad (2.23)$$

En remplaçant i_{on} et i_{off} par leurs expressions, on obtient :

$$\frac{\alpha V_e}{L} t + \frac{(\alpha - 1)(V_e - V_s)}{L} t = 0 \quad (2.24)$$

Ce qui peut se réécrire de la façon suivante :

$$\frac{V_s}{V_e} = \frac{1}{(\alpha - 1)} \quad (2.25)$$

Le rapport cyclique est [43]. :

$$\alpha = \frac{T_{on}}{T} \quad (2.26)$$

La tension et courant de sortie en régime établi selon :

$$V_s = \frac{1}{(\alpha - 1)} V_e \text{ Avec } \alpha > 1 \quad (2.27)$$

$$I_s = (\alpha - 1) I_e \quad (2.28)$$

Grâce à l'expression (2.28) on peut voir que la tension de sortie est toujours supérieure à celle d'entrée et le rapport cyclique variant entre (0 et 1), et que

théoriquement elle peut être infinie lorsque α se rapproche de 1. C'est pour cela que l'on parle de survolteur [44].

Pour la fréquence de découpage f , on en déduit l'ondulation de courant dans l'inductance et l'ondulation de la tension de sortie :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha \cdot V_s}{L \cdot f} \quad (2.29)$$

$$\Delta V_s = \frac{\alpha \cdot I_s}{C \cdot f} = \frac{\alpha \cdot V_e}{(\alpha - 1) \cdot R \cdot C \cdot f} \quad (2.30)$$

Le courant dans l'inductance est fonction de la puissance débitée par la source. On peut exprimer sa valeur moyenne en fonction du courant moyen dans la charge et du rapport cyclique :

$$I_L = \frac{I_s}{(\alpha - 1)} \text{ Avec } \alpha > 1 \quad (2.31)$$

Les contraintes sur l'interrupteur commandé et la diode sont les mêmes. En tension, on a :

$$V_{s.max} = |V_{d.max}| = \frac{V_e}{(\alpha - 1)} + \frac{\Delta V_s}{2} \quad (2.32)$$

Et en courant :

$$I_{s.max} = |I_{d.max}| = \frac{I_e}{(\alpha - 1)} + \frac{\Delta I_s}{2} \quad (2.33)$$

Les caractéristiques de tension et du courant du convertisseur Boost sont décrites par la figure suivante :

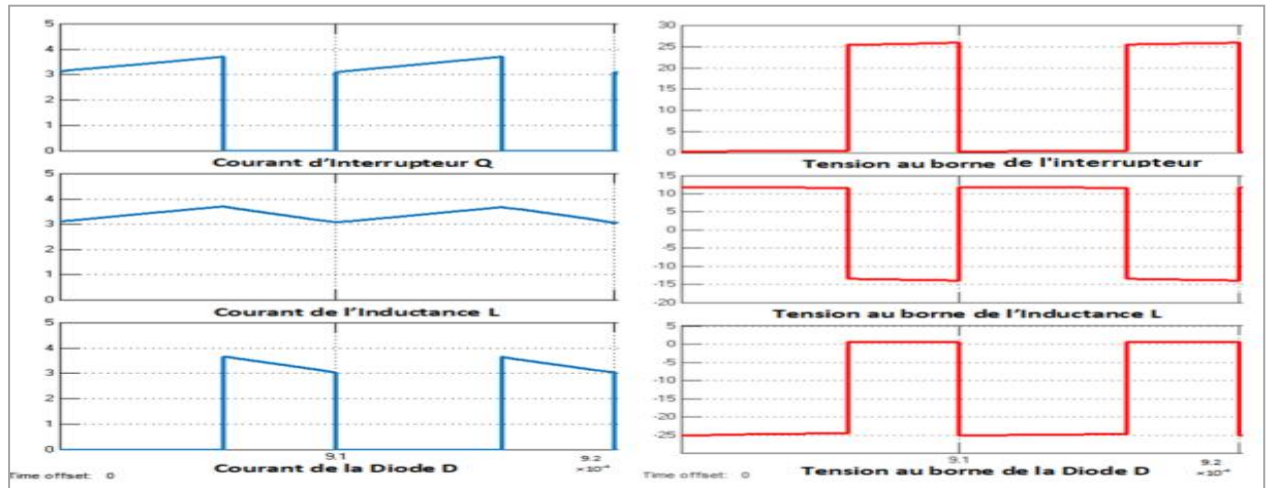


Figure 2.14 : Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Boost(40)

Convertisseur Buck

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur.

a) Schéma du convertisseur Buck

L'hacheur dévolteur, sous sa forme de base est présenté par la figure 2.18. Il présente les mêmes composantes clés que pour le convertisseur Boost.

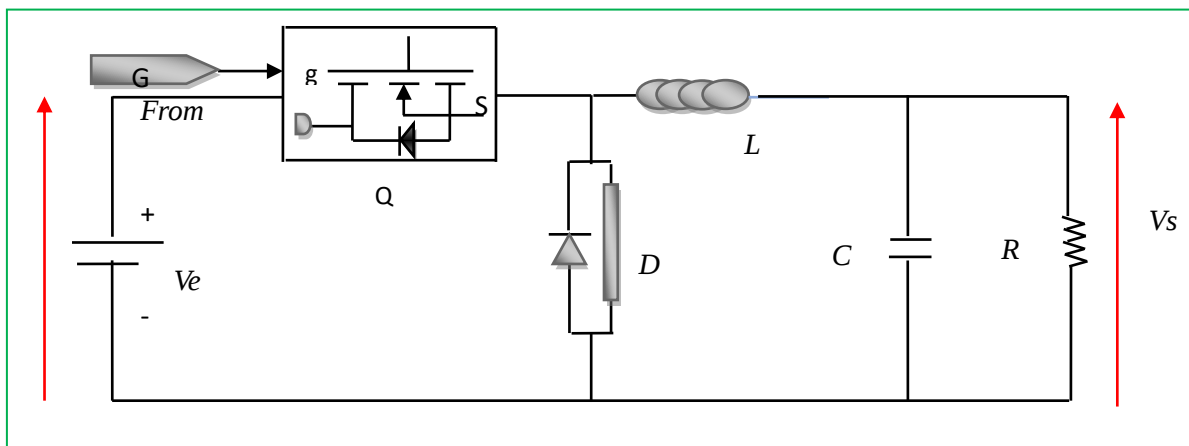


Figure 2.15 : Schéma électronique de convertisseur abaisseur Buck.

b) Principe de fonctionnement

Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à gauche du PPM. Alors, pour les deux modes de fonctionnement on a :

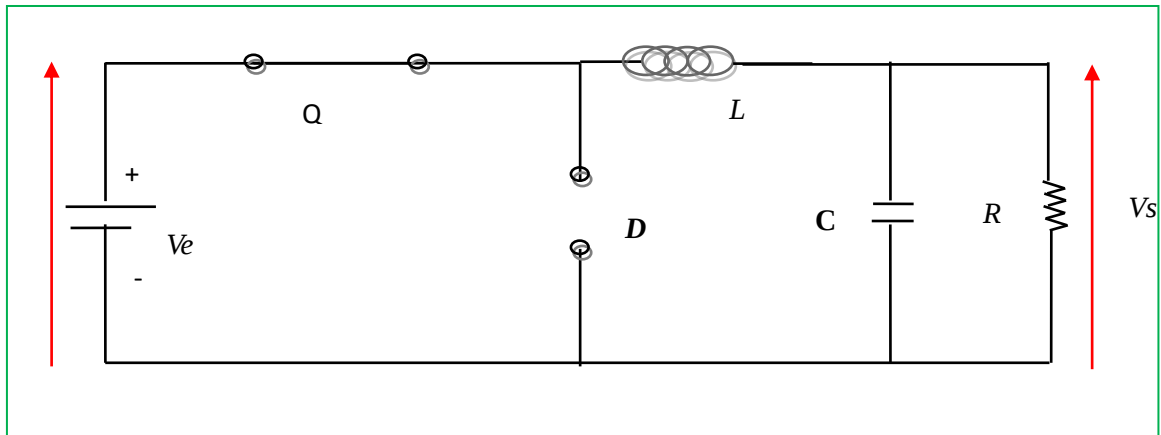


Figure 2.16: Convertisseur Buck Durant l'état On.

A) Pour T_{On} (Q fermé) :

a.1) L'équation de la Tension :

Pour Q fermé, on a les équations des tensions et :

$$V_T = 0 \quad \text{Et} \quad V_D = -V_e \quad (2.34)$$

Alors la tension aux bornes de l'inductance sera :

$$V_L = V_e - V_s = L \frac{di}{dt} > 0 \quad (2.35)$$

a.2) L'équation du courant : A partir de l'intégration de l'équation (2.35), on peut faire sortir

L'équation du courant i_L qui sera :

$$i_L = \frac{V_e - V_s}{L} t + I_{\min} \quad (2.36)$$

L'inductance alors emmagasine de l'énergie sous forme magnétique.

B) Pour T_{Off} (Q ouvert) : Si Q est désactivé après t_1 , la charge est déconnectée de son alimentation.

Le courant est toutefois maintenu par l'énergie stockée dans l'inductance L et circule à travers la diode D appelée diode de roue libre. Cette dernière permet d'évacuer l'énergie emmagasinée dans l'inductance à l'ouverture du commutateur sans créer de surtension.

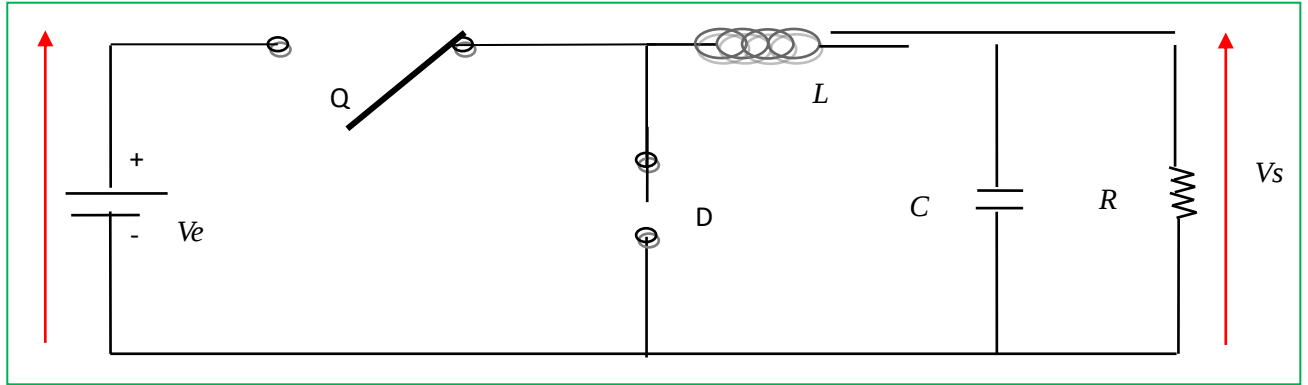


Figure 2.17 : Convertisseur Buck Durant l'état Off.

b.1) L'équation de la Tension :

Pour Q ouvert, les équations des tensions sont :

$$V_T = V_e \quad \text{Et} \quad V_D = 0 \quad (2.37)$$

Alors la tension L sera

$$V_L = -V_s = L \frac{di}{dt} < 0 \quad (2.38)$$

b.2) L'équation du courant :

$$i_L = \frac{-V_s}{L} t + I_{max} \quad (2.39)$$

Quoi qu'il en soit, la valeur moyenne V_s est inférieure à V_e . Dans le cas où la fréquence est augmentée, par exemple jusqu'aux (**kHz**), l'inductance nécessaire peut être réduite considérablement. La tension aux bornes de la charge est donnée par :

$$V_s = \frac{T_{on}}{T} V_e = \alpha V_e \quad (2.40)$$

Les caractéristiques de tension et du courant du convertisseur Buck sont décrites par la figure(2.17) suivante :

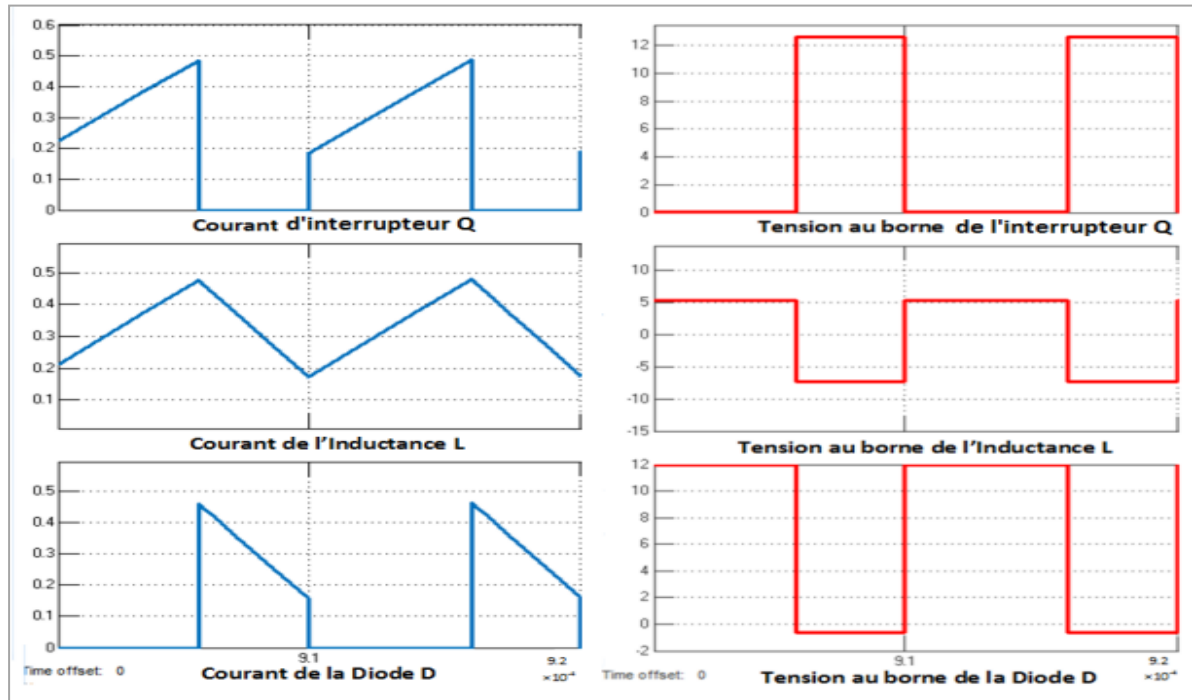


Figure 2.18 : Caractéristique de la tension et des courants dans le transistor et l'inductance d'un convertisseur Buck(40).

La figure (2.19), représente variation de la tension de charge avec le courant de charge pour un convertisseur Buck.

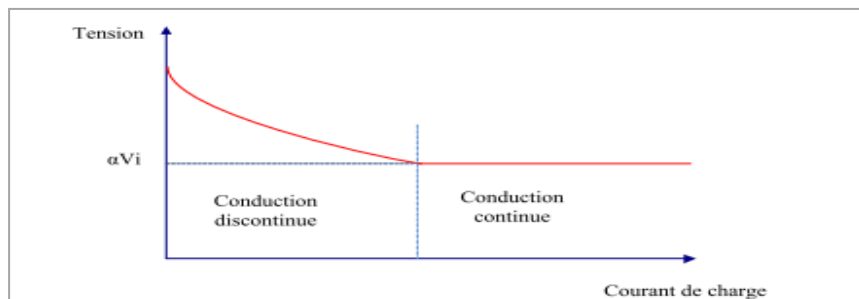


Figure 2.19:Variation de la tension de charge avec le courant de charge
Pour un convertisseur Buck(40)

3.1.1.4 Convertisseur Buck-Boost

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse.

a) Schéma du convertisseur Buck-Boost

Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation.

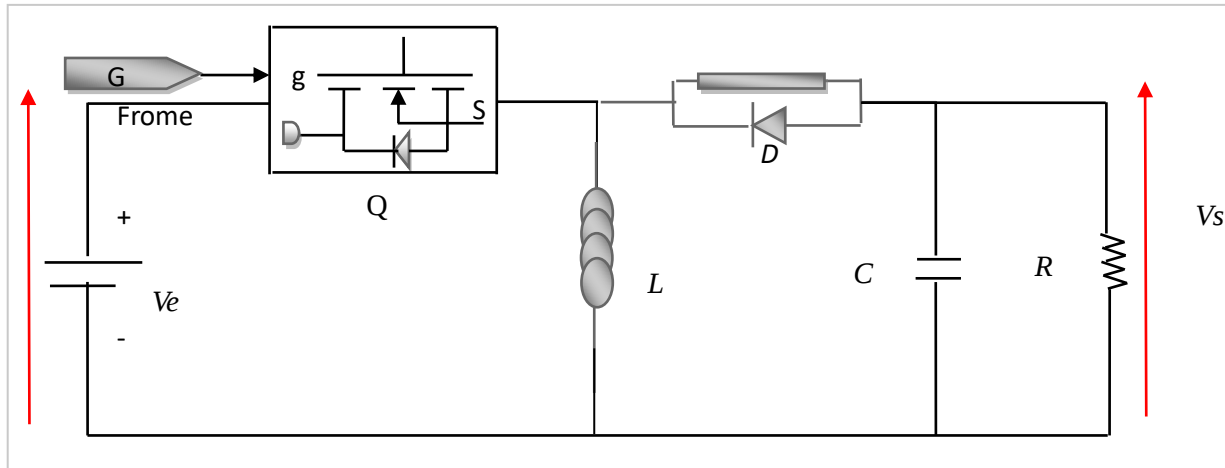


Figure 2.20 : Schéma de convertisseur inverseur Buck-Boost.

b) Principe de fonctionnement

Durant l'état On, l'énergie apportée par la source (GPV) est stockée dans l'inductance. L'énergie stockée dans l'inductance L est livrée ensuite à la charge pendant l'état Off.

A) Pour T_{on} (Q fermé) : l'interrupteur Q est conducteur pendant le temps (αT) , l'énergie est stockée dans L et la tension de sortie est négative par rapport au point commun : la diode D est alors bloquée.

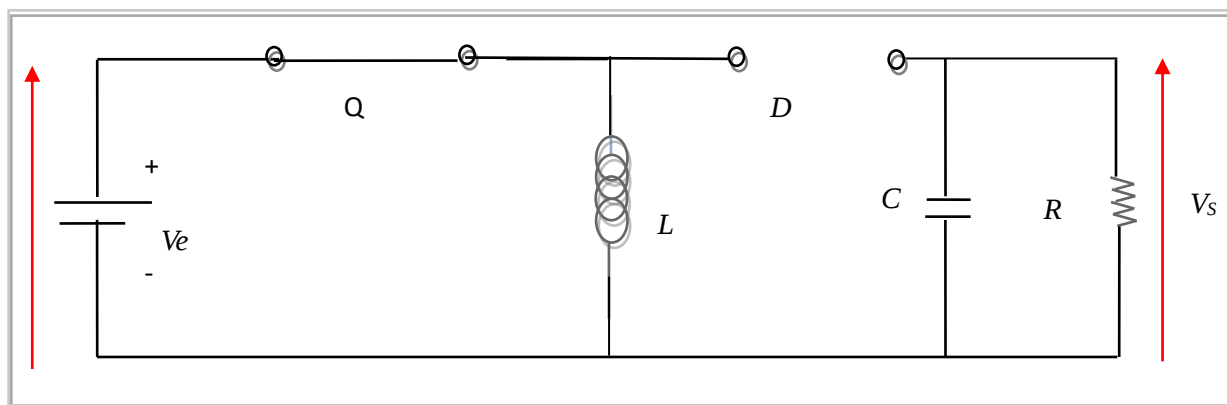


Figure 2. 21: Convertisseur Buck-Boost Durant l'état On.

a.1) L'équation de la Tension : Pour Q fermé on a les équations des tensions

$$V_T = 0 \text{ et } V_D = -V_e - V_e \quad (2.41)$$

Alors la tension aux bornes de l'inductance sera :

$$V_L = V_e = L \frac{di}{dt} > 0 \quad (2.42)$$

a.2) L'équation du courant :

$$I_L = \frac{V_e}{L} t + I_{min} \quad (2.43)$$

B) Pour T_{off} (Q ouvert) : le blocage de l'interrupteur Q provoque la décharge de l'inductance dans la charge R et le condensateur C. Cette décharge peut être totale ou partielle.

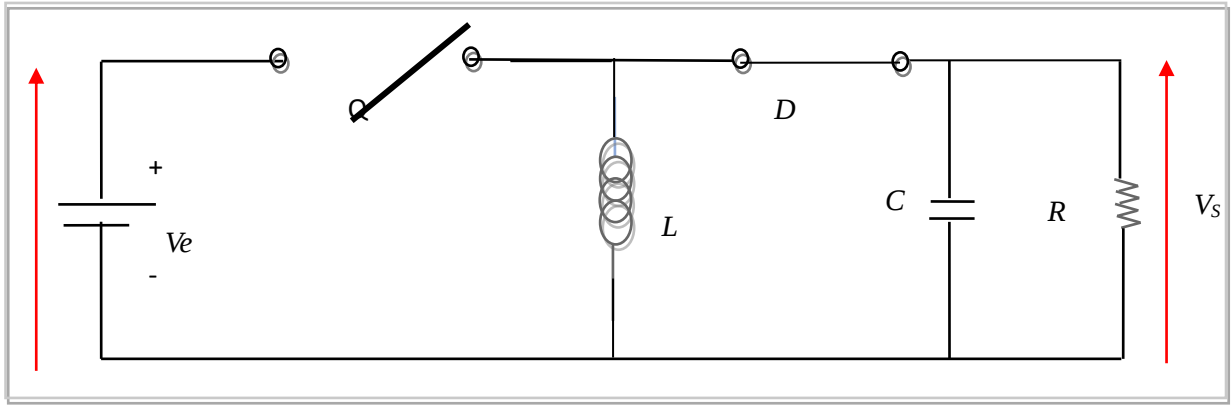


Figure 2.22: Convertisseur Buck-Boost Durant l'état Off.

b.1) L'équation de la Tension : Pour Q ouvert, les équations des tensions sont

$$V_D = 0 \text{ et } V_T = V_e + V_e \quad (2.44)$$

Alors la tension L sera :

$$V_L = -V_s = L \frac{di}{dt} < 0 \quad (2.45)$$

b.2) L'équation du courant :

$$I_L = \frac{-V_s}{L} t + I_{max} \quad (2.46)$$

Alor on peut concluds que la tension et courant de sortie et:

$$V_s = \frac{T_{on}}{T_{off}} V_e = \frac{\alpha}{(\alpha-1)} V_e \quad \text{Avec } \alpha > 1 \quad (2.47)$$

$$I_s = \frac{\alpha}{(\alpha-1)} I_e \quad \text{Avec } \alpha > 1 \quad (2.48)$$

Les caractéristiques des tensions et des courants du convertisseur Buck-Boost dans le cas de la conduction continue sont décrites comme suit :

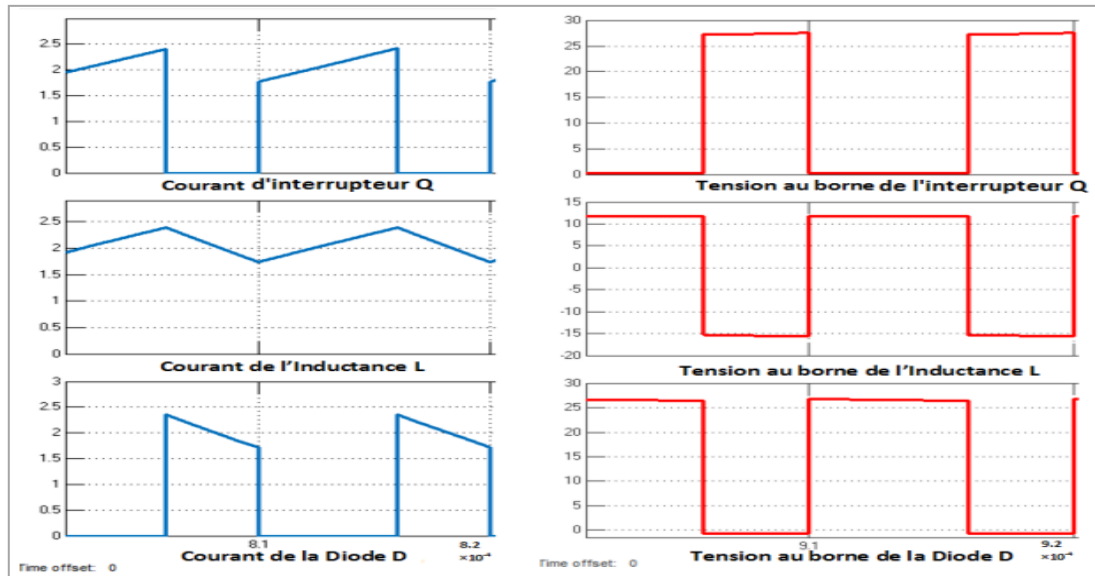


Figure 2.23 : Formes d'onde des courants et des tensions d'un convertisseur Buck-Boost(40)

Comparaison entre les différents types de convertisseur DC-DC

Le tableau 2.1 représente la comparaison entre les trois types des convertisseurs à découpage (dévolteur, survolteur et mixte), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques(48)

Tableau. 3 : Comparaison les principaux convertisseurs DC-DC .

Type d'hacheur	Rapport de transformation	Application
Hacheur en série	α	Convertie sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure
Hacheur en parallèle	$1/(1 - \alpha)$	Convertie une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur
Hacheur en série-parallèle	$(-\alpha)/(1 - \alpha)$	Lorsque la machine fonctionne en moteur lorsqu'elle est alimentée par le hacheur série ou en génératrice La machine fonctionne en génératrice

3.2Modélisation du hacheur survolteur (boost) d'un système photovoltaïque

3.2.1 Représentation d'un hacheur survolteur PV

Dans ce cas, la tension d'entrée de l'hacheur Boost représente la tension de générateur photovoltaïque PV (figure 2.24).

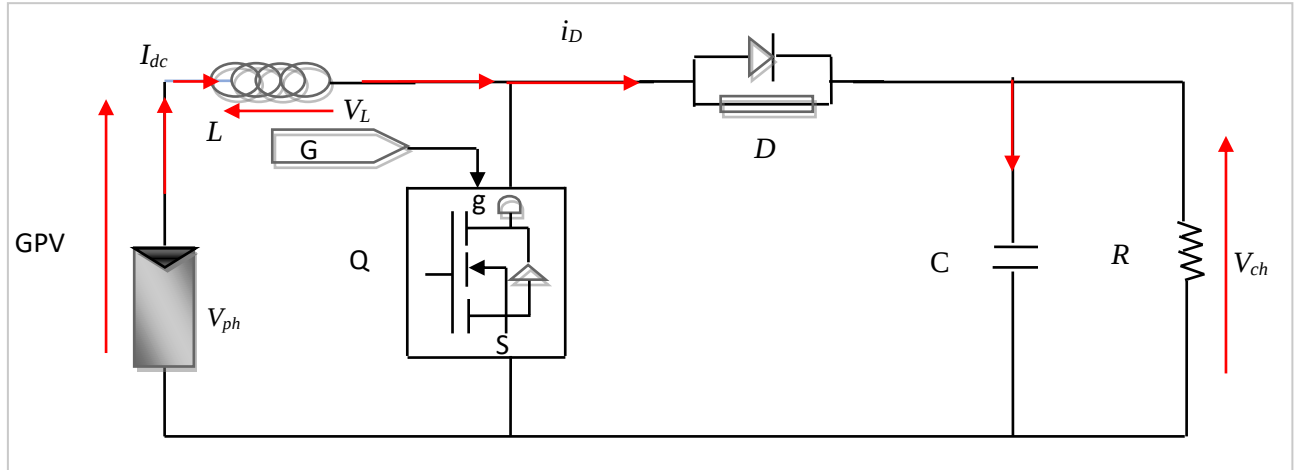


Figure 2.24:Schéma d'un hacheur parallèle (Boost) raccordé au générateur photovoltaïque.

Le hacheur élévateur est constitué d'un semi-conducteur est un hacheur à transistor de type parallèle alimenté sous la tension U_{ph} délivrée par :

- la source, qui se comporte en interrupteur commandé à l'amorçage (transistor : MOS, IGBT...) et une diode de manière périodique
- L'inductance L permet de lisser le courant appelé sur la source. Elle stocke de l'énergie électrique puis la restitue pour créer la surtension.
- Le condensateur C permet de limiter l'ondulation de tension de sortie.
- Les composants semi-conducteurs utilisés dans le hacheur survolteur seront considérés comme parfaits (chute de tension nulle à l'état passant et courant nul à l'état bloqué).

À partir des équations (2.27) et (2.28), nous pouvons déduire la résistance à la sortie du panneau PV (R_{pv}) en fonction de α et R_{ch} donne par l'équation (2.49) :

$$R_{ch} = \frac{R_{pv}}{1-\alpha} \quad \text{Avec } \alpha < 1 \quad (2.49)$$

Avec R_{ch} égale la résistance de l'entrée R_{pv} ,

Le rapport cyclique α s'écrit en fonction des résistances R_{pv} et R_{ch} :

$$\alpha = 1 - \sqrt{\frac{R_{pv}}{R_{ch}}} \quad (2.50)$$

Puisque le rapport α est inférieur à 1 et $\alpha < 1$, le convertisseur ne joue le rôle d'un élévateur que si la charge R_{pv} remplit la condition suivante : $R_{ch} > R_{pv}$

3.3 Electronique de puissance et d'énergie des convertisseurs

3.3.1 Electronique de puissance :

L'électronique de puissance est la branche de l'électrotechnique qui a pour objet de l'étude de la conversion statique d'énergie électrique (notamment les structure les composants, les commandes et les interactions avec l'environnement).

L'électronique de puissance traite l'énergie électrique par voie statique. Elle permet :

- Une utilisation plus souple et plus adaptée de l'énergie électrique
- Une amélioration de la gestion, du transport et de la distribution de l'énergie électrique
- Une discrétion par réduction des masses et des volumes ainsi par un fonctionnement ultrasonore des dispositifs.

3.3.2 Convertisseurs des Puissances

La conversion statique est réalisée au moyen de convertisseur statique qu'ils sont des dispositifs qui transforme l'énergie électrique disponible en une forme appropriée à l'alimentation d'une charge [49].

L'énergie électrique est surtout distribuée sous forme de tensions alternatives sinusoïdales ou continues. L'électronique de puissance permet de modifier la présentation de l'énergie électrique pour l'adapter aux différents besoins. L'électronique de puissance utilise des convertisseurs statiques. Ces derniers utilisent des interrupteurs électroniques [52].

1- Définition puissance :

Considérons un convertisseur statique quelconque relié à un récepteur. Nous adopterons la convention « générateur » pour le convertisseur et donc la convention « récepteur (ou charge) » pour le récepteur [47].

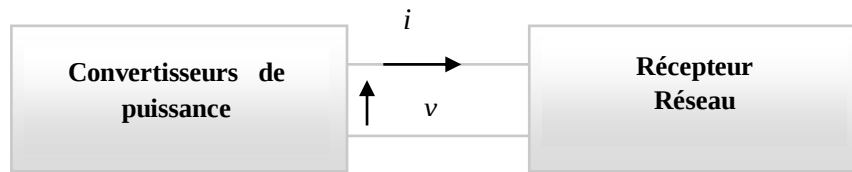


Figure 2.25: Couplage de convertisseur avec un récepteur.

a. Puissance instantanée

La puissance instantanée est, comme en régime continu, définie par le produit «courant $\times$ tension ». En principe, cette puissance est variable dans le temps.

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (2.51)$$

Ou puissance en [watt] , Tension en [V] et Courant en [A].

Remarque : Si la puissance p est supérieur à 0 ($p > 0$) alors le convertisseur fournit la puissance.

b. Puissance active

La puissance active P est la valeur moyenne de la puissance instantanée $P(t)$:

$$P(t) = P_{moyenne} = \langle v(t) \cdot i(t) \rangle \quad (2.51)$$

Ce n'est qu'en régime sinusoïdal alternatif que l'on a :

$$P(t) = V \cdot I \cdot \cos(\varphi) \quad (2.52)$$

Ou φ la phase

c. Puissance apparente

La puissance apparente S est définie par le produit « $V_{eff} \times I_{eff}$ ». C'est une grandeur théorique qui sert à dimensionner les générateurs :

$$S = V_{eff} \times I_{eff} \quad (2.53)$$

➤ Facteur de puissance :

Pour évaluer ce phénomène, on définit le facteur de puissance k ($k < 1$) :

$$k = \frac{\langle v(t) \cdot i(t) \rangle}{V_{eff} \cdot I_{eff}} = P/S \quad (2.54)$$

Pour un mauvais facteur de puissance (k et proche de 0), le courant I peut devenir très élevé. Ce n'est qu'en régime sinusoïdal que l'on a :

$$k = \cos(\varphi). \quad (2.55)$$

Où φ la phase .

3.3.3 Convertisseurs d'Energie

Le convertisseur agit sur une énergie pour la changer en une autre énergie pour obtenir un nouvel effet recherché par l'être humain, ou la nature.

- Energie & Puissance

L'énergie et la puissance ces deux entités sont distinctes mais reliées par une relation simple qui fait intervenir le temps:

$$E(t) = P(t) \cdot t \quad [\text{Watt seconde}] \text{ ou } [\text{Joule}]. \quad (2.56)$$

3.3.4 Fonctionnement du convertisseur électronique de puissance

Dans le block convertisseur de puissance d'un DC/DC d'un système photovoltaïque convertie en tension électrique, connaissant la consommation (kWh), on calcule l'énergie nécessaire que doit avoir le générateur PV, on en déduit aussi la puissance crête.

La figure (2.26) représente le convertisseur électronique de puissance de type commutation.

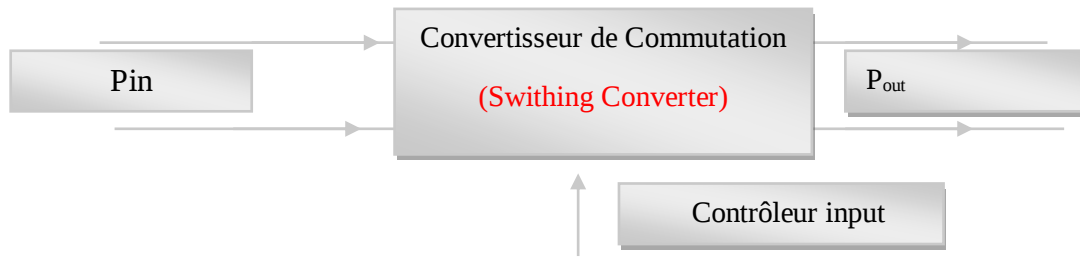


Figure 2.26: Convertisseur de commutation

Avec P_{in} : puissance d'entrée et P_{out} : puissance de sortie.

3.4 Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque et contrôlé par MPPT

3.4.1 Principe De La Commande MPPT

Par définition, une commande MPPT, associée à un étage intermédiaire d'adaptation, permet de faire fonctionner un GPV de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Ainsi, quel que soit les conditions météorologiques (température et irradiation), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (V_{PPM} et I_{PPM}). La chaîne de conversion photovoltaïque sera optimisée à travers un convertisseur statique (CS) commandé par une MPPT [29]. Il peut être représenté par le schéma de la Figure 2.27.

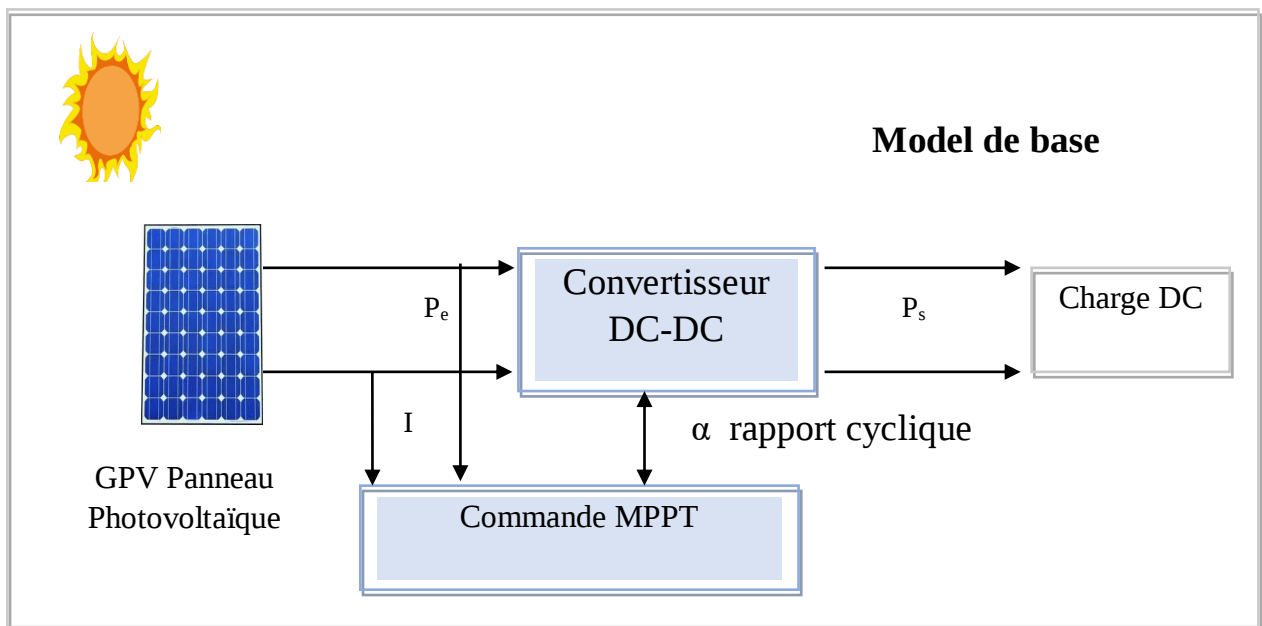


Figure 2 .27 : Chaîne de conversion d'énergie solaire comprenant un panneau photovoltaïque, un convertisseur BOOST, une commande MPPT et une charge.

L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (courant I et tensions V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu' il se place sur le MPP [8].

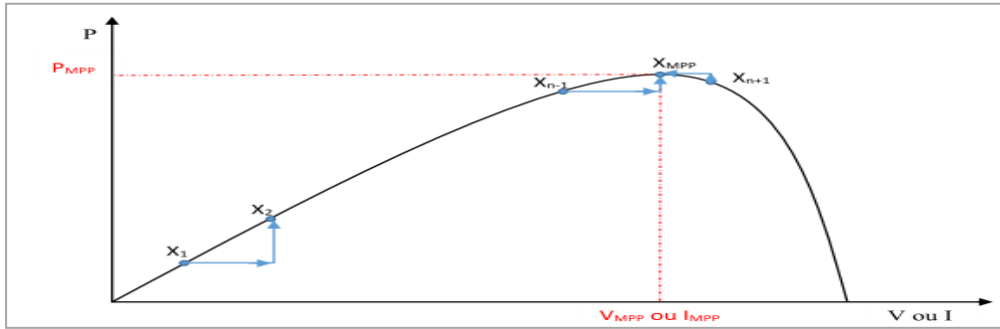


Figure 2.28 : Principe de la commande MPPT.

Le rendement MPPT (η_{MPPT}) est défini comme étant le rapport entre la puissance maximale délivrée par la cellule et la puissance lumineuse incidente P_{in} [54].

$$\eta_{MPPT} = \frac{P_{Max}}{P_{in}} \quad (2.57)$$

Le recentrage de η_{MPPT} ($\eta_{MPPT}\%$) de pertes de puissance d'un module PV (P_{in}), qui correspond à l'entrée de l'étage d'adaptation, par rapport à la fourniture de la puissance maximale qu'il pourrait produire (P_{Max}).

3.4.2 Gestion de la MPPT

La figure (2.29) illustre trois cas de perturbations. Suivant le type de perturbation, le point de fonctionnement bascule du point de puissance maximal PPM1 vers un nouveau point P1 disfonctionnement plus ou moins éloigné de l'optimum. Dans ce cas, pour une variation d'ensoleillement il suffit de réajuster la valeur du rapport cyclique pour converger vers le nouveau point de puissance maximum PPM2 [41][52]. Dans le second cas, pour une variation de charge on peut également constater une modification du point de fonctionnement qui peut retrouver une nouvelle position optimale grâce à l'action d'une commande. Enfin dans le dernier cas, une variation du point de fonctionnement peut se produire lié aux variations de température de

fonctionnement du GPV, bien qu'il faut également agir au niveau de la commande(55)

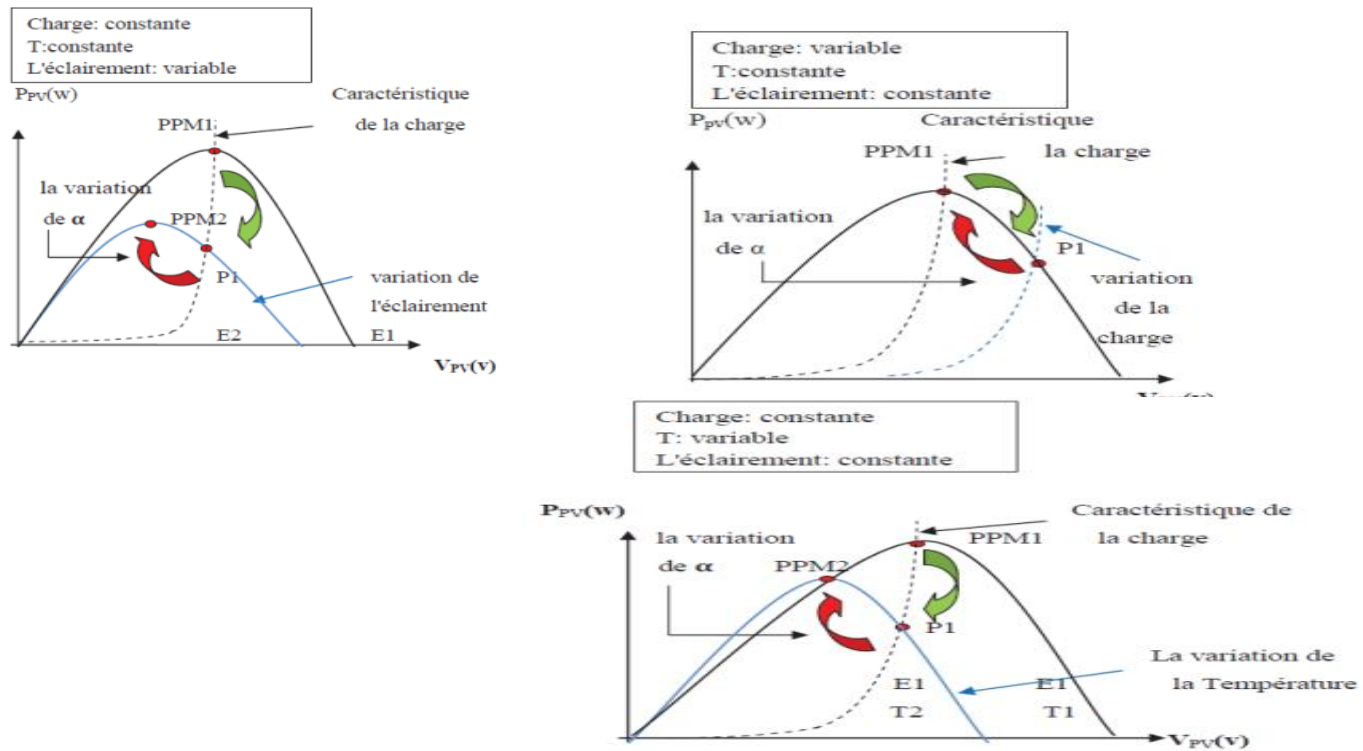


Figure 2.29: Recherche et recouvrement du Point de Puissance Maximale a) suite à une variation d'éclairement, b) suite à une variation de charge, c) suite à une variation de température.

3.5 Cheminement maximum de Power Point (MPPT)

Un MPPT, (Maximum Power Point Tracker) est un principe permettant de suivre, comme son nom l'indique, le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens .

3.5.1 Suivi de la puissance maximale du générateur photovoltaïque :

La poursuite du point maximum de la puissance (MPPT) est une partie essentielle dans les systèmes photovoltaïques. Plusieurs techniques sont développées depuis 1968 la première loi de commande de ce type adaptées à une source d'énergie renouvelable de type photovoltaïque PV. Ces techniques se diffèrent entre eux par leur complexité, nombre de capteurs requis, la vitesse de convergence, coût, rendement et domaine d'application .

3.5.1.1 Les Algorithmes MPPT :

Les algorithmes MPPT sont nécessaires dans les applications photovoltaïques car le MPP d'un panneau solaire varie en fonction de l'irradiation et de la température, de sorte que l'utilisation d'algorithmes MPPT est requise afin d'obtenir la puissance maximale d'un panneau solaire.

Simple « perturbez et observez » l'algorithme de cheminement de MPP :

La méthode de perturbation et d'observation «P/O» est une approche largement répandue dans la recherche du MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque V_{ref} et I_{ref} respectivement. Elle peut déduire le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et la température. C'est l'algorithme de poursuite du point de puissance maximale (MPPT) le plus utilisé, et comme son nom l'indique il est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de V_{ref} ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie en vue d'une éventuelle correction de ce rapport cyclique.

L'avantage de cette méthode c'est qu'elle a la particularité d'avoir une structure de régulation simple, et peu de paramètre de mesure. Elle peut déduire le point de puissance maximale même lors des variations de l'éclairement et la température, pour toutes ces raisons, la méthode P&O est devenue une approche largement répandue dans la recherche du MPPT [8].

La figure (2.29) montre l'organigramme de l'algorithme de P&O tel qu'il doit être implémenté dans le microprocesseur de control.

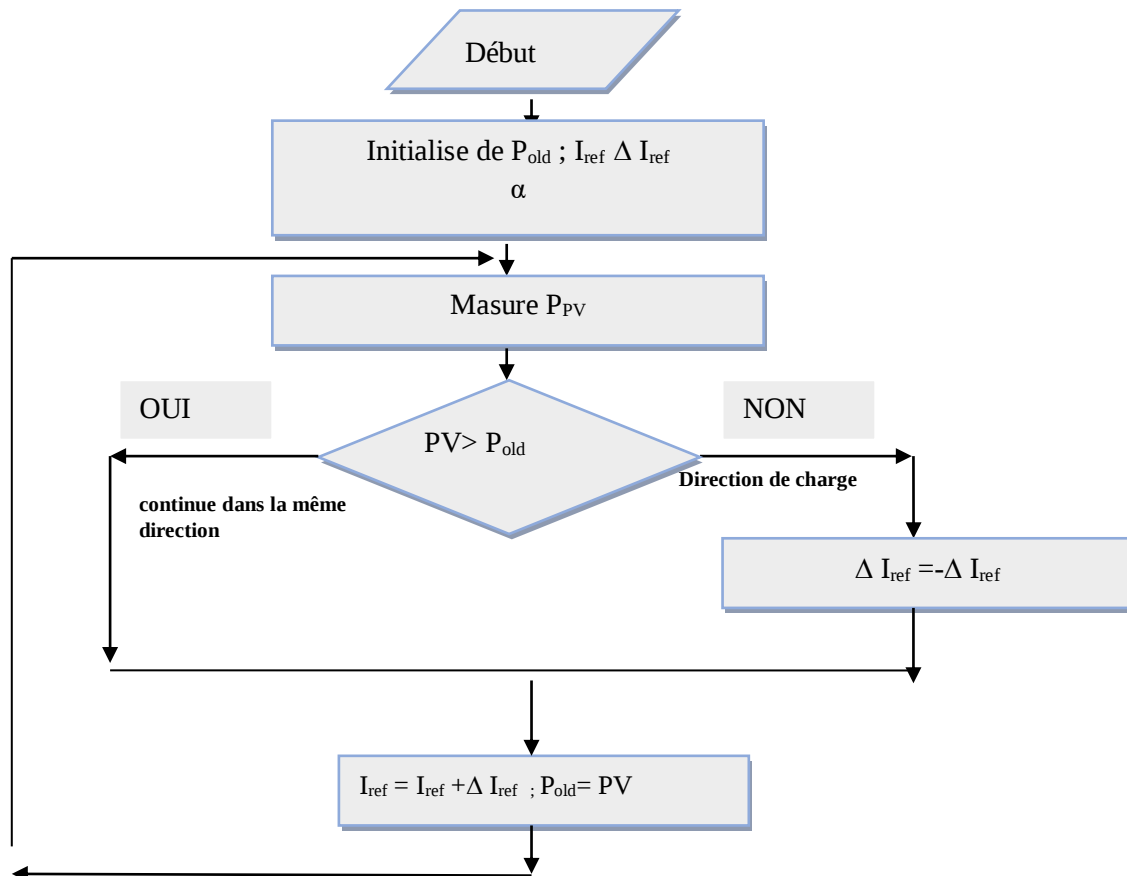


Figure 2.30 : Organigramme de l'algorithme Perturbation et Observation (P&O).

3.6 Les convertisseurs DC/AC (Onduleur)

L'onduleur est un convertisseur statique DC/AC de haute performance.

Il convertit la tension continue, en tension alternative contrôlée de façon très précise. La source de tension continue peut être, par exemple un, panneaux solaires .

Figure (2.31) représente schéma de principe de l'onduleur.

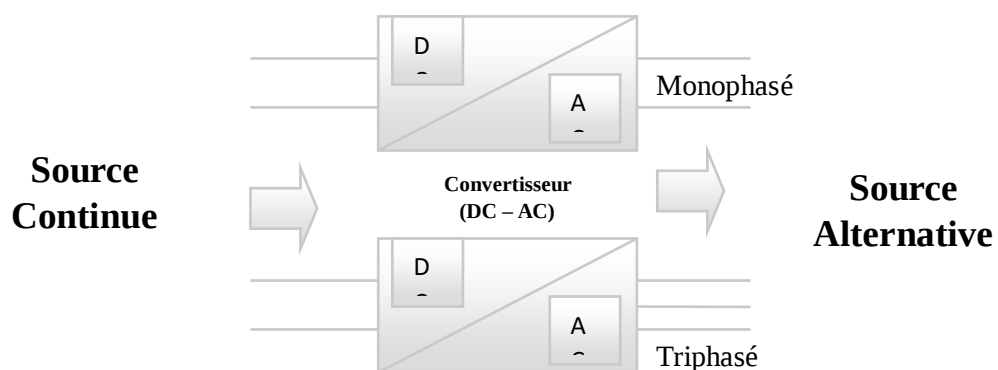


Figure 2.31 : Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative DC-AC monophasé et triphasé.

3.6.1 Principe de fonctionnement d'un onduleur

Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie alternative à un autre niveau de tension (ou de courant). Il est dit autonome s'il assure de lui même sa fréquence et sa forme d'onde [54]. Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion

- a) **Onduleur Monophasé** : Ce type d'onduleur délivrant en sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement destinée aux alimentations de secours. Deux classes d'onduleurs monophasés sont à distinguer, suivant leur topologie (42)
- b) **Onduleur triphasée** : Ce type d'onduleur est généralement recommandé pour des applications de grande puissance. La structure de tel convertisseur se fait par l'association, en parallèle, de trois onduleurs monophasés en demi pont (ou en pont) donnant trois tensions de sortie déphasées de 120° degrés, l'une par rapport à l'autre [55]. [55].

Conception d'impacte d'énergie du système photovoltaïque hybrid turbine connecté au réseau avion

3.6.2 Système photovoltaïque hybride turbine relié à une grille

La puissance photovoltaïque assurée à la grille de service gagne de plus en plus la visibilité, alors que la demande de la puissance mondiale augmente. Elle enregistre une augmentation exponentielle avec l'Allemagne et le Japon menant la liste des pays ayant la plus grande capacité installée. Disponibilité sans conditions de la source d'énergie l'amitié environnementale de ces systèmes sont terminées leurs avantages importants les sources d'énergie traditionnelles telles que le pétrole et le gaz naturel, mais leur efficacité et contrôlabilité support comme inconvénients principaux. En plus de ceci, les opérateurs du système de transmission sont imposants normes dures, quand le système photovoltaïque est relié le réseau de service. Beaucoup d'exigences comme la stabilité du système de puissance et la qualité de puissance sont des demandes primaires. Par conséquent, les grandes recherches des efforts sont déployées dans le contrôle de ces systèmes afin d'améliorer leur comportement. Tous les systèmes photovoltaïques connectent la grille de service par un inverseur de source de tension et a convertisseur de poussée. Le générateur photovoltaïque s'est relié par des inverseurs au réseau de distribution sous une climatique standard condition (1000 W/m^2 et 25°C)(53). Figure (2.31) :

Une réalisation possible d'une électronique de puissance pour le système relié à une grille de PV.

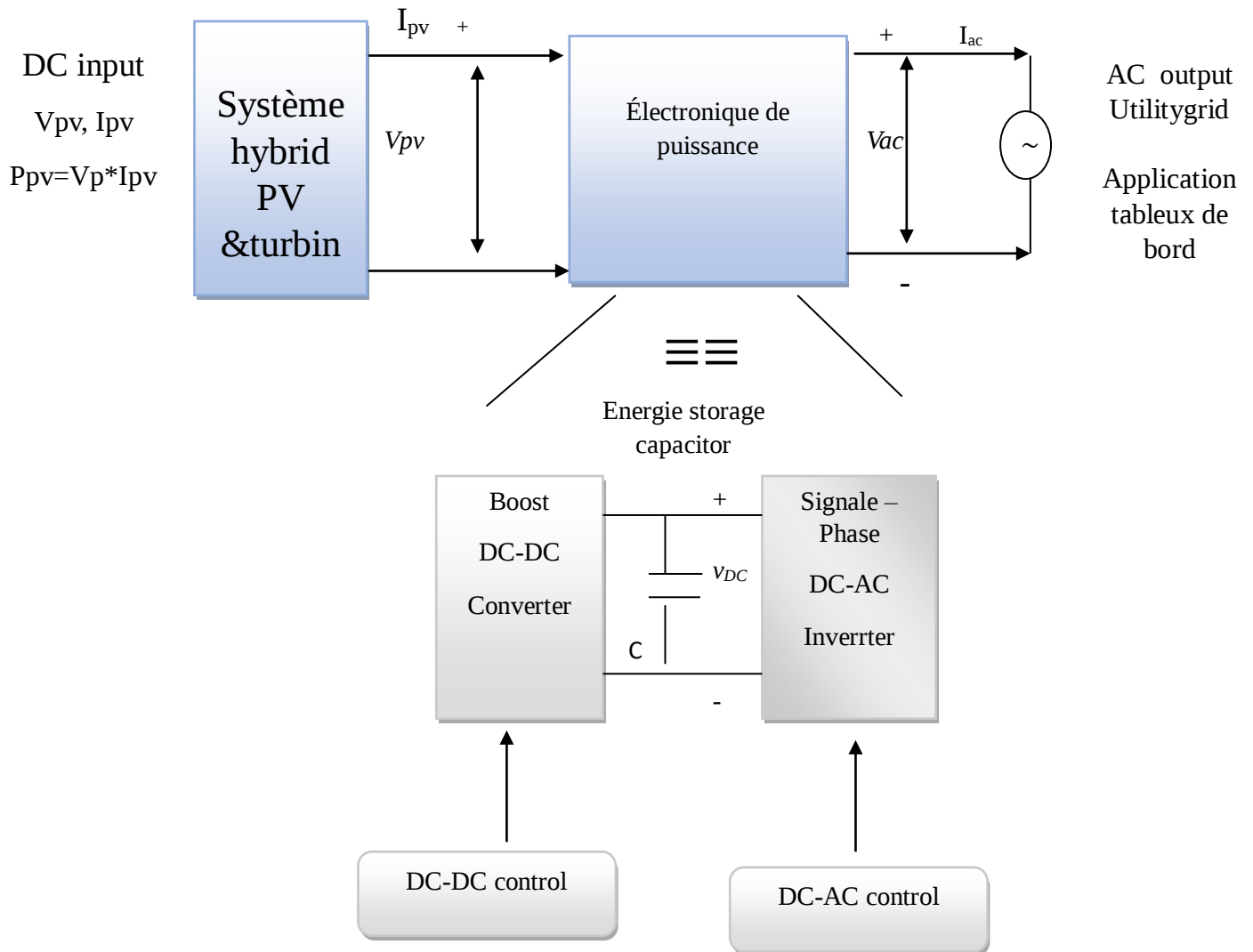


Figure 3.32: Architecture possible du système PV avec contrôleur raccordée au réseau (Une réalisation possible de convertisseur de puissance) (56)

3.7 Conclusion

La modélisation du système photovoltaïque est une étape essentielle qui nous permet d'introduire un certain nombre de modèles puis d'évaluer la caractéristique de chaque élément ainsi que les paramètres constitutants. Dans ce chapitre nous avons présenté le système photovoltaïque ainsi une généralité sur les convertisseurs statiques de type DC-DC et DC-AC. Ensuite, nous avons donné les différentes structures de chaque convertisseur Hacheur et l'onduleur. Enfin, nous avons nous avons donné la topologie d'un système photovoltaïque-réseaux.

Cette modélisation est une étape essentielle, elle va nous permettre d'étudier la simulation du système photovoltaïque relié à une grille.

Chapitre 3 :

Simulation et Performance d'impact l'énergie du Système Hybride PV - Turbine des avions

III. Chapitre 3 :Simulation et Performance d'impact l'énergie du Système Hybride PV - Turbine des avions

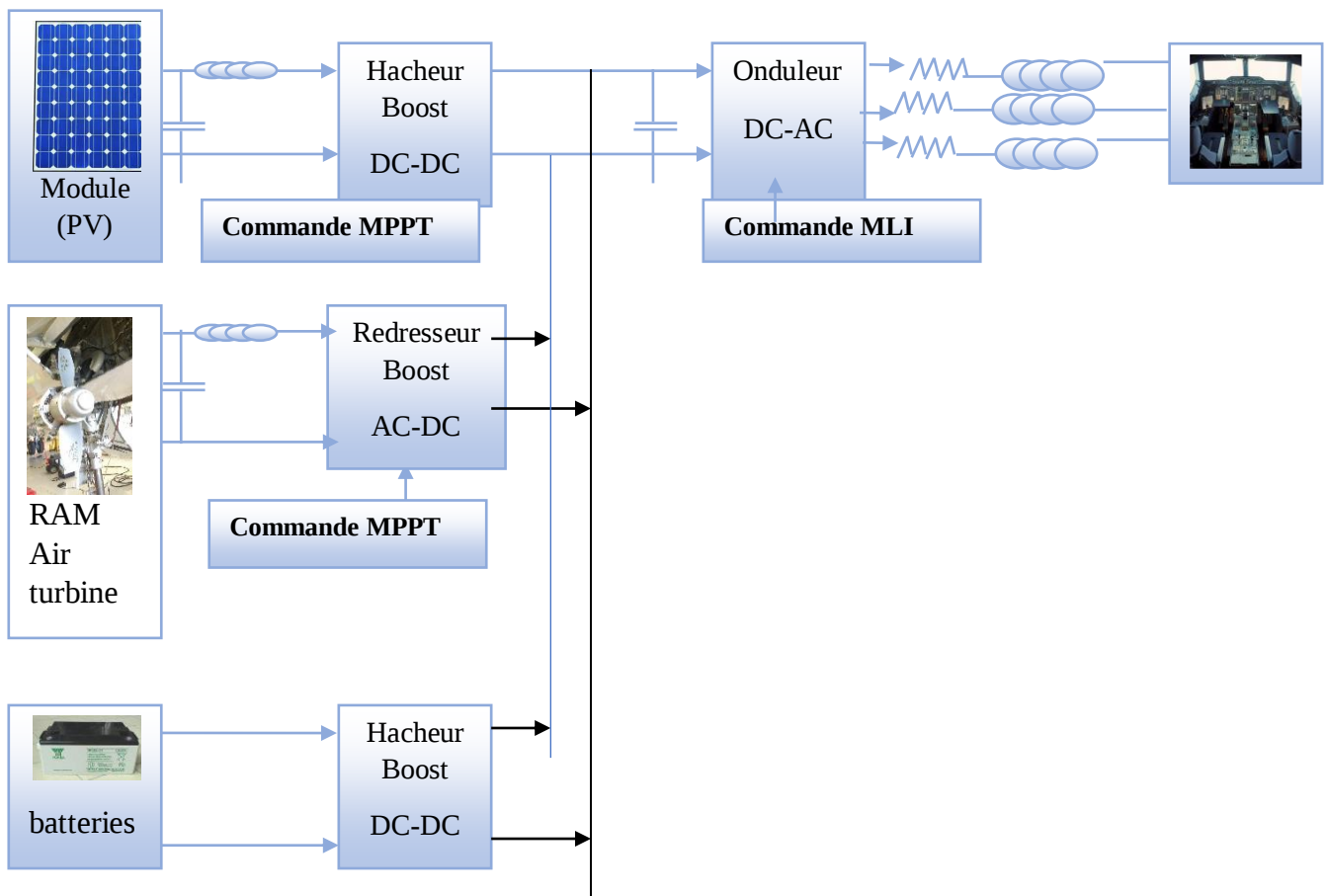
3. Introduction

Dans ce chapitre nous avons fait une modélisation des systèmes hybrides PV - Turbine des avions. Maintenant dans ce chapitre, nous présentons les résultats des simulations d'un système hybride photovoltaïque – turbine. La chaîne du système proposée contient une représentation détaillée des composant principaux du ce système photovoltaïque liée aux réseaux électrique de bord avion, le générateur PV, les convertisseurs (DC-DC) et (DC-AC), un filtre (LC), une charge du côté (AC), et le réseau électrique de bord avion. Pour améliorer l'efficacité de conversion d'énergie PV, il est nécessaire de poursuivre le point de puissance maximale (MPP) de la source d'entrée, est c'est pour cela on utilise la commande MPPT avec une méthode classique P&O. Ainsi toutes les parties liées à l'onduleur qui est commandée par MLI pour transfère l'énergie produite de système hybride dans le réseau en gardant la tension alternative constante, Les simulations ont été effectuées sous le logiciel Matlab/Simulink.

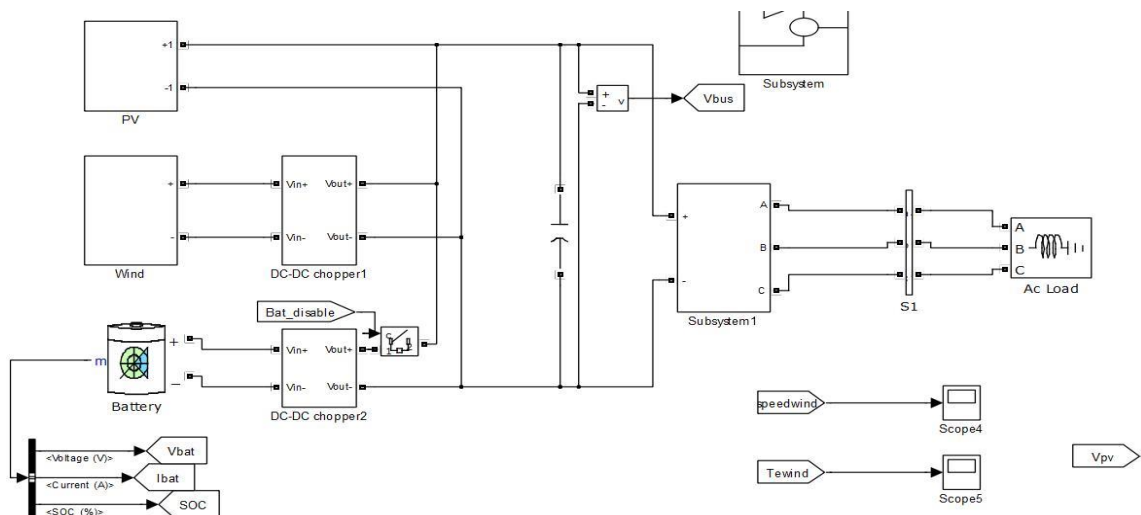
3.1Modélisation du système hybride :

Les systèmes hybrides sont habituellement élaborés pour répondre aux besoins énergétiques de l'électrification des Réseau électrique BT(base tension) Table avion. Le rôle d'un système hybride est d'assurer la demande de charge et d'optimiser sa production afin de combler l'énergie demandée par la charge durant la période d'intermittence et tout en maintenant la qualité d'énergie fournie.

L'architecture de modèle de conception complète du système multi-source étudié dans le cadre de ce travail est illustrée dans la figure 3.1. Le système d'énergie hybride autonome proposé est composé de la combinaison de trois sources.



(a) model de la conception



(b) Model simulation sous matlab

Figure 3.1 : Système hybride PV - Turbine des avions (a) model de la conception, (b) Model simulation sous MATLAB

3.2 Description du système hybride :

Le modèle global du système photovoltaïque représenté par la Figure (3.1) est constitué de:

3.2.1 Générateur photovoltaïque (GPV)

Un générateur photovoltaïque a un comportement équivalent à une source de courant shuntée par une diode. Plusieurs modèles mathématiques sont développés pour présenter son comportement non linéaire

3.2.2 Système photovoltaïque connecté au réseau électrique

Principe du fonctionnement d'un système Photovoltaïque connecté au réseau :

La figure (3.2) représente la configuration du principe de fonctionnement système photovoltaïque raccordé au réseau électrique de distribution. Le générateur photovoltaïque est relié à un convertisseur (DC/DC) qui assure le suivi du point de fonctionnement optimal, et alors l'ensemble est connecté au réseau électrique par l'intermédiaire d'un convertisseur (DC/AC) commandé par une stratégie qui permet de synchroniser la source photovoltaïque avec le réseau .

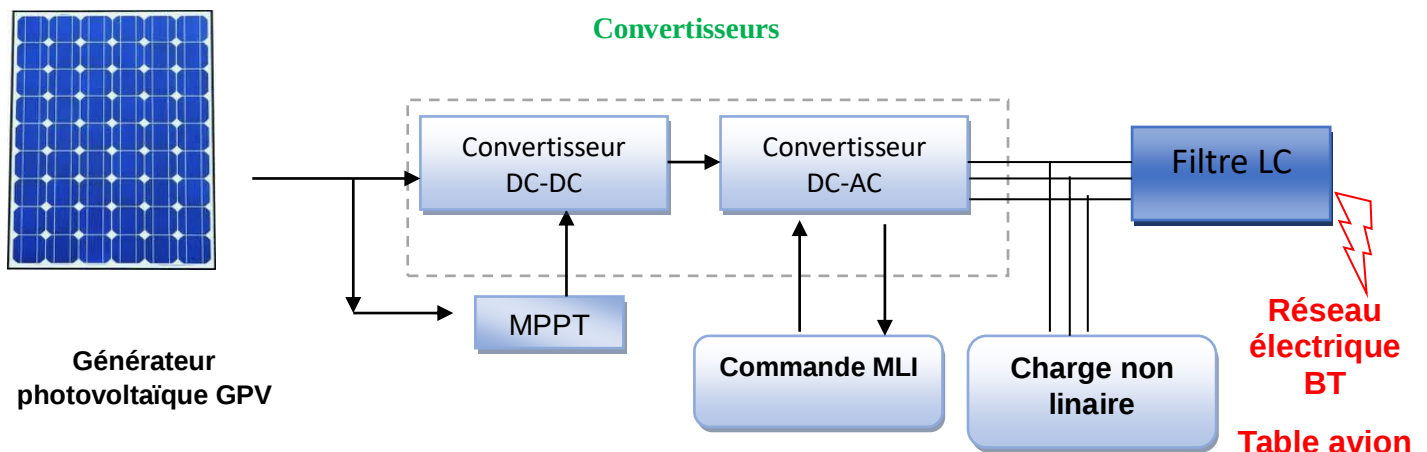


Figure 3.2 : Schéma synoptique d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique (système globale) .

Le système PV représente par un panneau est un générateur photovoltaïque. Il est constitué de cellules montées en série et parallèle. Les paramétra I_{pv} et V_{pv} sont respectivement le courant et la tension du GPV. Pour que ce système fonctionne et utilise qualitativement, Il est relie à un convertisseur de tension DC-DC connu sous le nom du Hacheur Élévateur.

3.2.3 Générateur éolien

On appelle énergie éolienne, la conversion de la force des vents (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique (ou énergie cinétique) par l'intermédiaire d'une génératrice (**Figure 3.3**) [4].

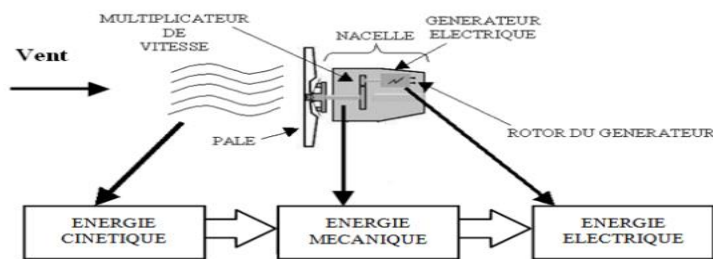


Figure 3.3 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

- Principe de fonctionnement de l'aérogénérateur :

Un aérogénérateur permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Pour convertir l'énergie cinétique en énergie électrique le générateur va utiliser le phénomène d'induction. En effet ce dernier est composé de deux parties, une partie mobile le rotor et une partie fixe, le stator, permettant de créer un champ magnétique et de générer un courant électrique. L'éolienne est également équipée d'une girouette permettant l'orientation des pales en fonction de la direction du vent. Elle doit être également fixée solidement au sol [19]

3.2.4 Classifications des éoliennes selon la puissance

Tableau 4 : Classification des éoliennes [21]

Classification des éoliennes	Diamètre (m)	Puissance (w)
petite éolienne	entre 0,5 m et 20 m	Inférieur à 100 KW
moyenne éolienne	20m et 50m	100 KW a 1 MW
grande éolienne	50 m à 100 m	plus de 1 MW

3.2.5 Zones de fonctionnement de l'éolienne

Compte tenu des informations précédentes, la courbe de puissance convertie d'une turbine, généralement fournie par les constructeurs, qui permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent [20]:

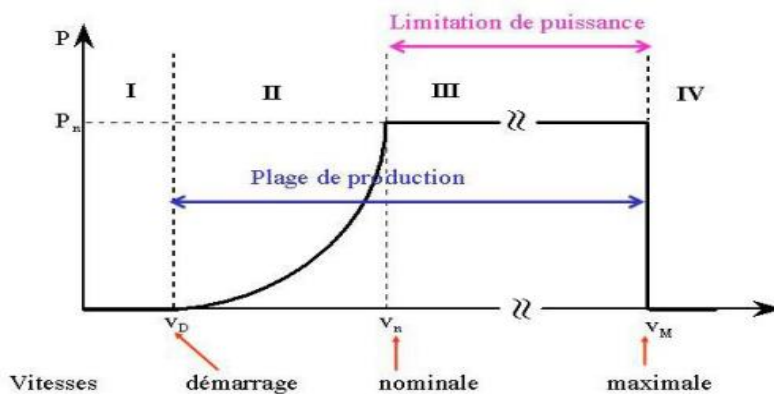


Figure 3.4 : Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.

- V_D : La vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs, V_D varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.
- V_n : La vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs.
- V_M : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, V_M vaut 25m/s[3].

- Zone I : $V < V_D$: la vitesse du vent est très faible et nous ne pouvons pas produire d'énergie
- Zone II : $V_D < V < V_n$: Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.
- Zone III : $V_n < V < V_M$: La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine (P_n). Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge .

3.2.6 Convertisseur survolteur (BOOST) avec commande MPPT

Il permet d'Élever la tension du GPV. L'hacheur Boost est constitué d'un interrupteur commandé à la fermeture et l'ouverture, d'une inductance L_{pv} , d'un diode D et de deux condensateurs à l'entre C_{pv} et à la sortie C_{dc} . Le condensateur C_{pv} transforme la source de courant GPV en source de tension tandis que C_{dc} est le bus continu du système. L'interrupteur est commandé par un algorithme MPPT qui permet au système de fonctionne à sa puissance maximale.

1- Convertisseur DC-AC (onduleur) connecté avec filtre RL

Dans les systèmes photovoltaïques connectés au réseau de distribution, un onduleur est nécessairement utilisé. Où, la connexion de cet onduleur au réseau s'effectue à travers un filtre RL et réseaux électrique [42-43]. L'onduleur transforme la tension continue du bus à une tension alternative. Il est constitué de trois (3) branches dont chacun possède deux interrupteurs complémentaires. Ces interrupteurs sont commandés à l'aide une MLI modélisé à partir de la tension du bus tension V_{res} , et le courant I_{res} .

Les filtres R, L : Les courants qui transitent entre le convertisseur DC-AC et le réseau sont imposés par les bobines constituant le filtre R, L.

2- Le réseau électrique:

Il représente le réseau électrique de distribution publique.

Exemple : Le réseau électrique BT On suppose que le réseau électrique de distribution publique est de puissance innée ce que conduit une amplitude et fréquence constantes de valeurs $V = 400 / 230 \text{ V}$ et $f = 50 \text{ Hz}$.

3.3 Modélisation d'un système photovoltaïque :

3.3.1 Modèle idéale d'une cellule photovoltaïque sous Matlab

Pour résoudre cette équation on utilise le block 'Algébriques Constraint' qui est intégré dans la bibliothèque 'Simulink/Math Opération'

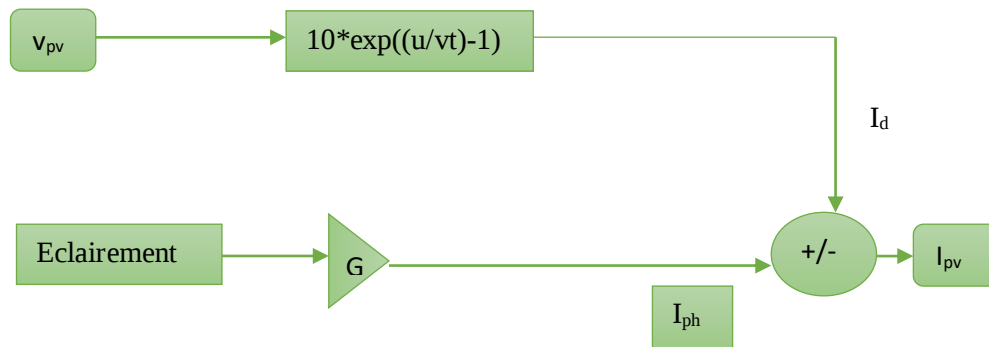


Figure 3.5 : Schéma de simulation d'une cellule photovoltaïque idéale.

La bibliothèque SimPowerSystems du logiciel de simulation MATLAB sera utilisée pour réaliser l'analyse comportementale de circuits électriques correspondant aux modèles mathématiques des différentes parties de la centrale.

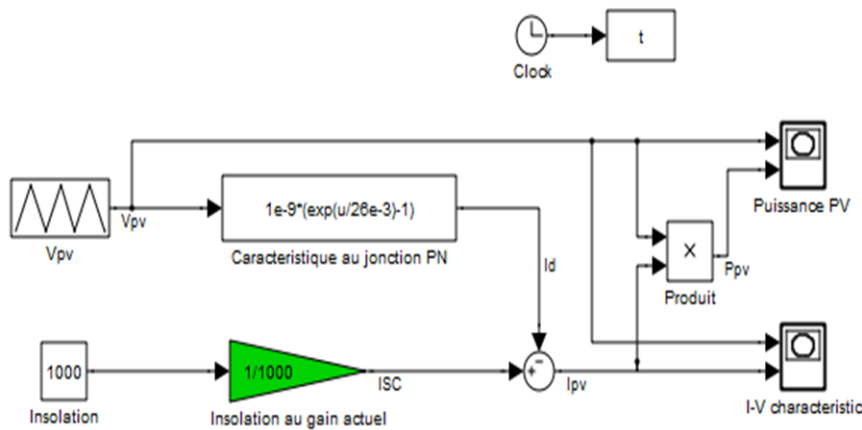


Figure 3.6 :Modèle de simulation d'une cellule photovoltaïque photovoltaïque idéale.

3.3.2 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque :

Les paramètres de simulation sont donnés dans le tableau (4-1):En prend par exemple une cellule de module KC-60 ce module possède les caractéristique suivantes à 1000 (w/m2) et 25 °C

**Tableau 5 .Valeurs des paramètres de simulation
caractéristique de la cellule de module KC-60.**

Les paramètres de module	Puissance optimale	Courant de court circuit Ir (A)	Tension à circuit ouvert Voc (V)	Commande optimale	Tension optimale OU maximale Vr à PPM (V)	Le nombre des cellules en série Ns
La valeur de chaque paramètre	60 w	3.73A	20V	3.55A	16.9V	1

Les figures (3.6 et 3.7) suivantes représentent les caractéristique d'une cellule PV pour un rayonnement constant de 1000 w/m2 et une température de 25°C

3.3.3 Les résultats de simulation et interprétation.

- La caractéristique ($P_{pv} = f(V_{pv})$) est donnée par la figure (3.7) .

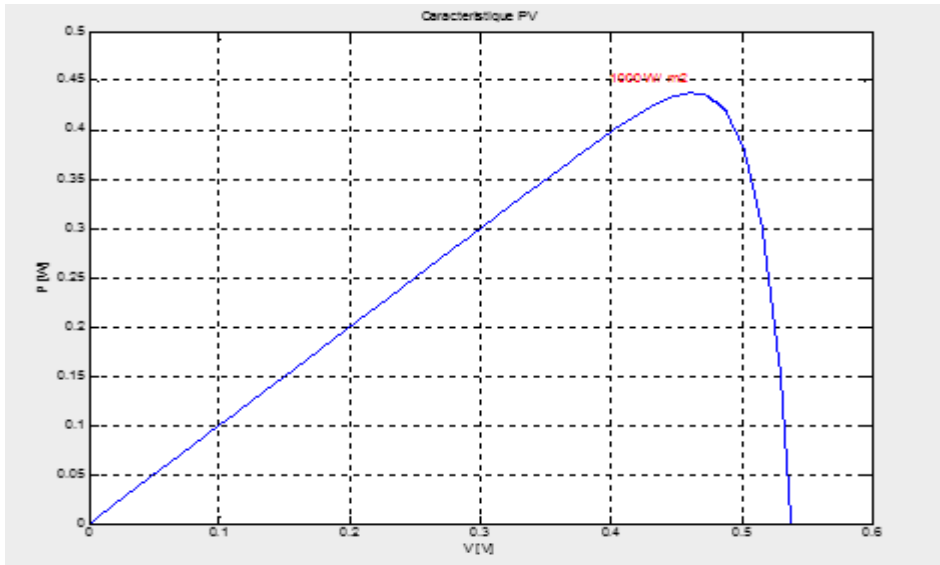


Figure 3.7 : Résultats de simulation de Caractéristique P-V d'une cellule PV.

- La caractéristique ($I_{pv} = f(V_{pv})$) est donnée par la figure (3.8) .

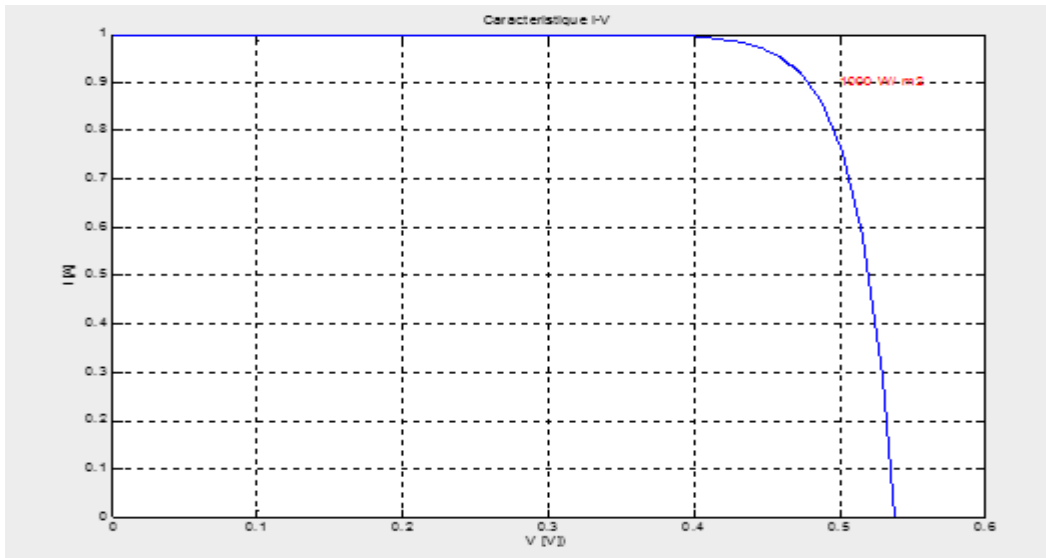


Figure 3.8 : Résultats de simulation de Caractéristique I-V d'une cellule PV.

3.3.4 Modèle réelle d'une cellule photovoltaïque sous Matlab

Pour résoudre cette équation on utilise le block 'Algébriques Constraint' qui est intégré dans la bibliothèque 'Simulink/Math Opération'

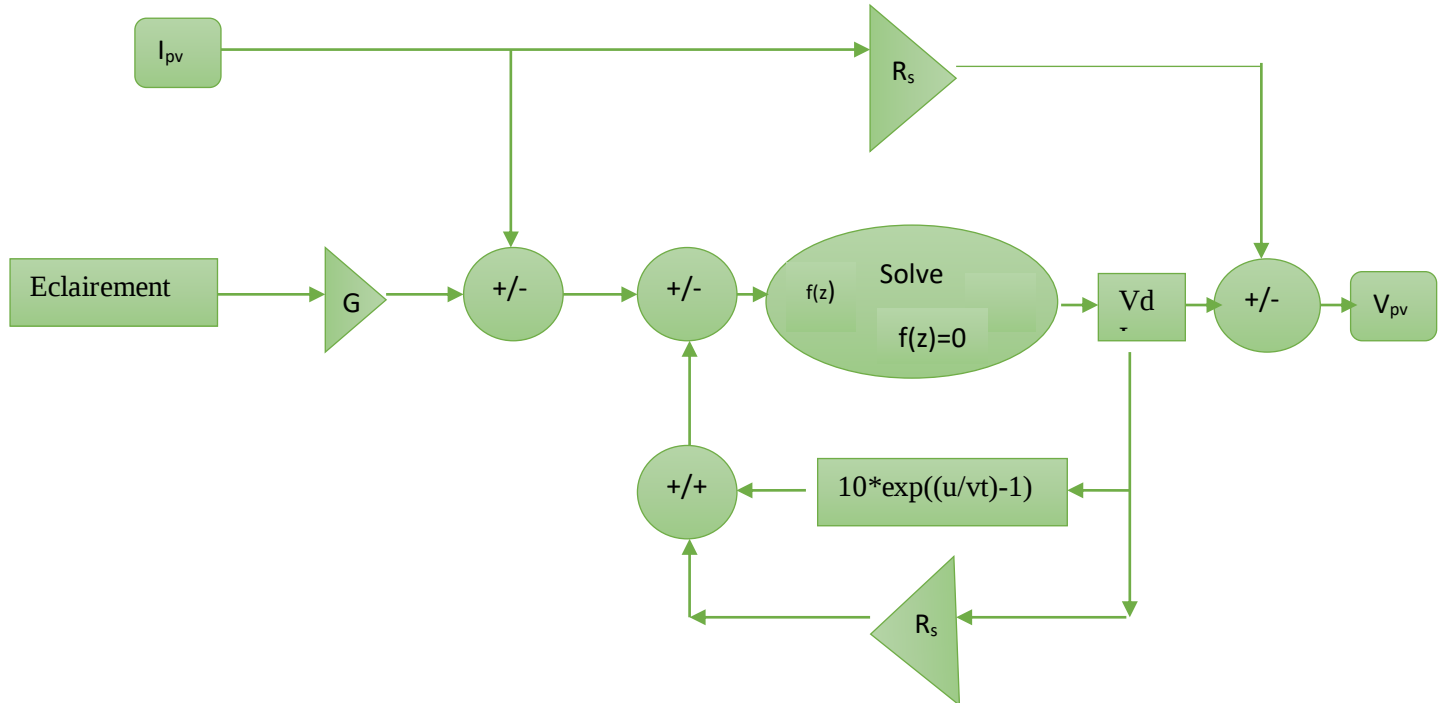


Figure 3.9 : Schéma de simulation d'une cellule photovoltaïque réelle.

La bibliothèque SimPowerSystems du logiciel de simulation MATLAB sera utilisée pour réaliser l'analyse comportementale de circuits électriques correspondant aux modèles mathématiques des différentes parties de la centrale.

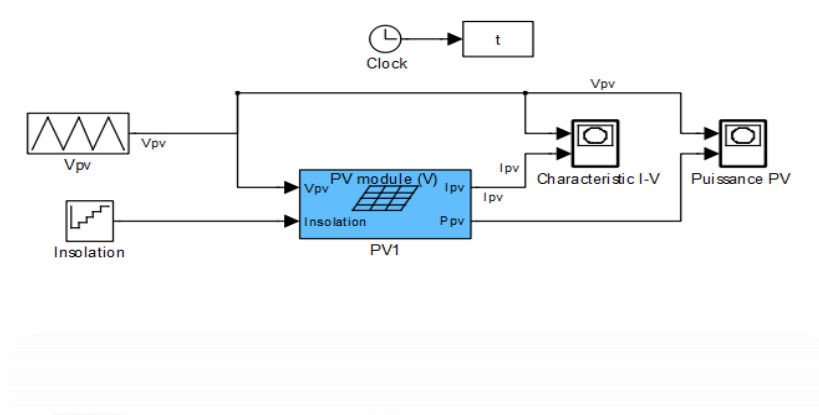


Figure 3.10 : Modèle de simulation d'une cellule photovoltaïque réelle.

- Les paramètres de simulation sont donnés dans le tableau (3.3):

Tableau 6. Valeurs des paramètres de simulation.

Les paramètres de module	La valeur de chaque paramètre
Le nombre des cellules en série N_s	1
La tension maximale V_r à PPM (V)	0.4822
La tension en circuit ouvert V_{oc} (V)	0.598
Le courant maximal I_r à PPM (A)	3.04
Le courant de court-circuit I_r (A)	3.325

- Les résultats de simulation et interprétation.

Des résultats des courbes pour différents grandeurs sont illustrés sur les figures (3.11 et 3.12).

La Figure 3.9, représente des résultats de simulation de module PV Caractéristique ($I_{pv} = f(V_{pv})$) : À température ($T = 25^\circ\text{C}$). et l'éclairement (E) entre 200 et 1000 w/m^2 .

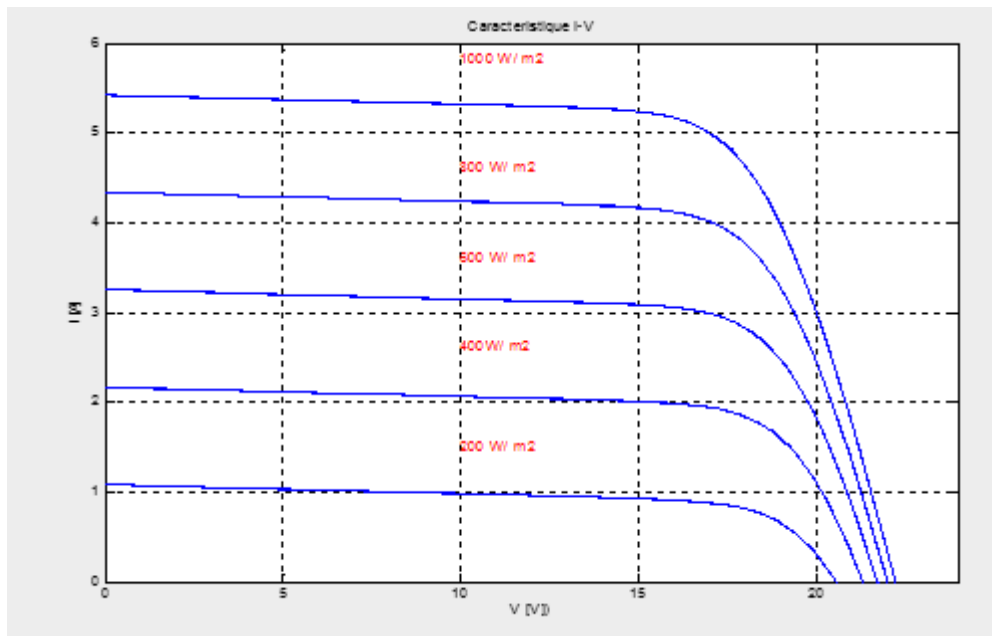


Figure 3.11 : Résultats de simulation des caractéristiques Courant-Tension Pour différents insolation et une température $T=25^\circ\text{C}$.

D'après la figure 3.9, on remarque une forte diminution du courant de court-circuit Par rapport à l'insolation et une faible diminution de la tension du circuit ouvert.

La figure 3.10 représente des résultats de simulation de Module PV Caractéristique ($P_{pv} = f(V_{pv})$) : À température ($T = 25^{\circ}\text{C}$). et l'éclairement (E) entre 200 et 1000 w/m^2 .

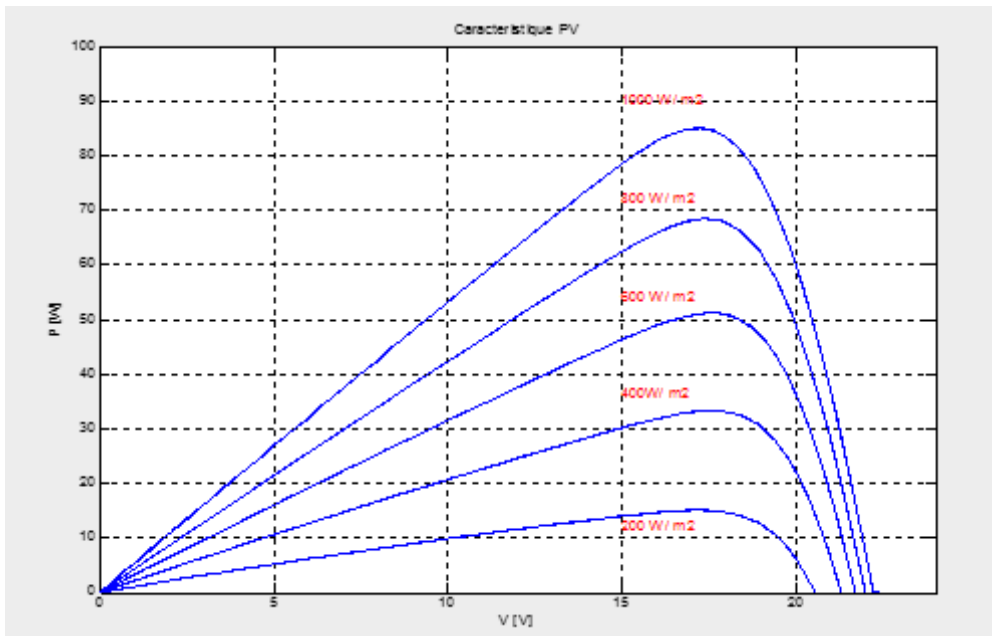


Figure 3.12: Résultats de simulation des caractéristiques Puissance-Tension Pour différents insolation et une température $T=25^{\circ}\text{C}$.

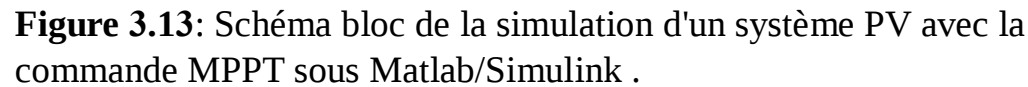
D'après la figure 3.10 on remarque que, l'éclairement influe proportionnellement sur la puissance et la tension du circuit ouvert du GPV.

3.3.5 Simulation d'un système de convertisseur avec MPPT

Dans cette section, on :

- Analyse la conception et la simulation d'une commande MPPT numérique sont « perturbation-observation qu'on applique aux convertisseurs DC-DC survolteur.
- On effectue la simulation du système dans les conditions standards (1000 W/m^2 , $25^{\circ}\text{C}+273.15$.) pour extraire la puissance optimale de l'installation photovoltaïque. Donc la tension du générateur PV après

- Pour montrer bien l'efficacité de la commande MPPT sur la puissance maximale, nous avons simulé le système avec conditions standards fixe (1000 W/m^2 , $25^\circ\text{C}+273.15$) , et cette simulation est appliquée en deux systèmes sans et avec MPPT les résultats obtenus sont les suivantes :



La figure (3.14) illustre le bloc schématique de SIMULINK de la commande de poursuite MPPT avec commande MLI :

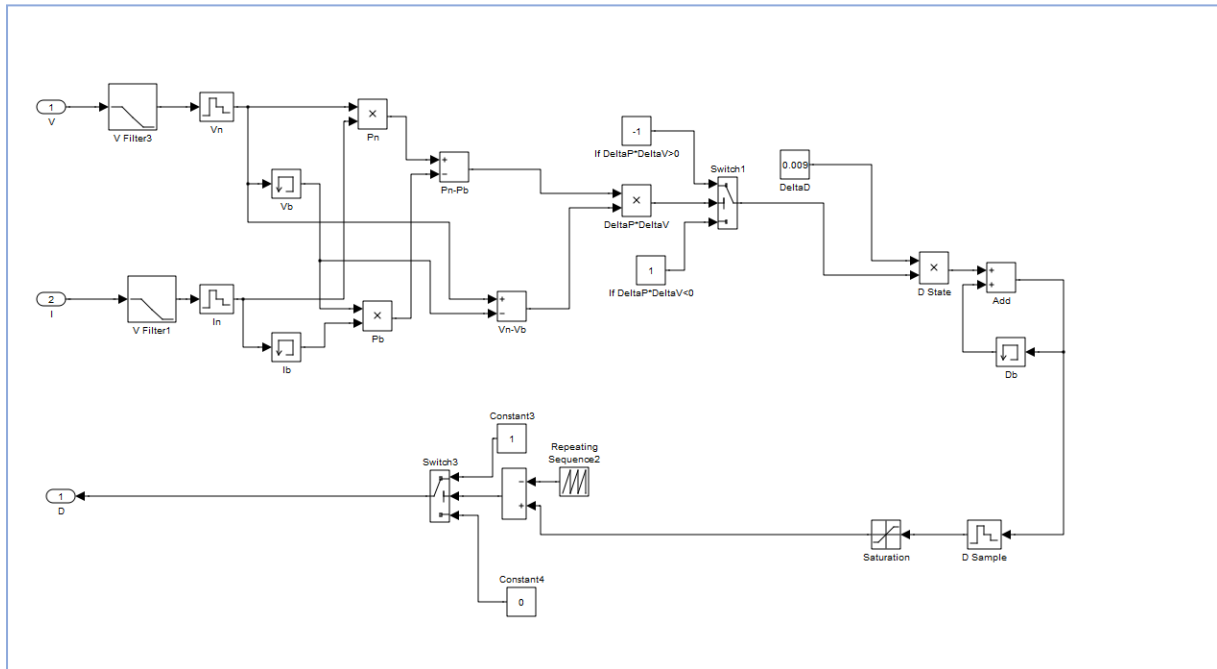


Figure 3 .14 : Schéma block de la commande MPPT« perturbation-observation » sous Matlab/Simulink.

La figure 3.14, représente schéma du bloc de la commande MLI sous Matlab/Simulink.

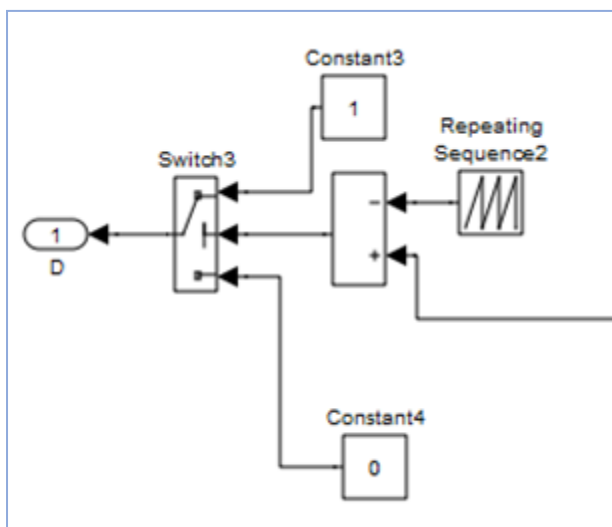


Figure 3.15: Schéma bloc de la commande MLI sous Matlab/Simulink.

Le Tableau 7 présente la variation de la puissance para port la charge avec MPPT

Type de sécurité	SYSTEME Avec MPPT P&O					
Paramètre	MPPT hacheur		GPV		Puissance ideal	
	d	E	P	E	P	0.0001419
Valeurs	0.001	0.000328	220	0.000354	226.9	

Le Tableau 8 présente la variation de la puissance para port la charge sons MPPT

Type de sécurité	SYSTEME Sons MPPT P&O					
Paramètre	hacheur		GPV		Puissance ideal	
	E	P	E	P	0.0001419	
Valeurs	9.115E- 005	63.19	0.0001056	63.47		

En remarque toujours le système photovoltaïque donne la puissance max se que exprimer le rôle de la commande MPPT.

Les résultats de simulation du système photovoltaïque adapté par la commande MPPT « perturbation et observation » représentent par les figures (4.9) à (4.14). Ces figures représentent la tension, le courant et la puissance générées par le générateur photovoltaïque. Ainsi, la tension, le courant et la puissance à la sortie du système photovoltaïque. Ces résultats montrent que l'hacheur survolteur et la commanda MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles.

L'hacheur survolteur fournie une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur photovoltaïque. Et la commande MPPT adapte le générateur PV à la charge: transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

1- Système Photovoltaïque avec MPPT

1.1 Résultats a la sortie du GPV avec MPPT:

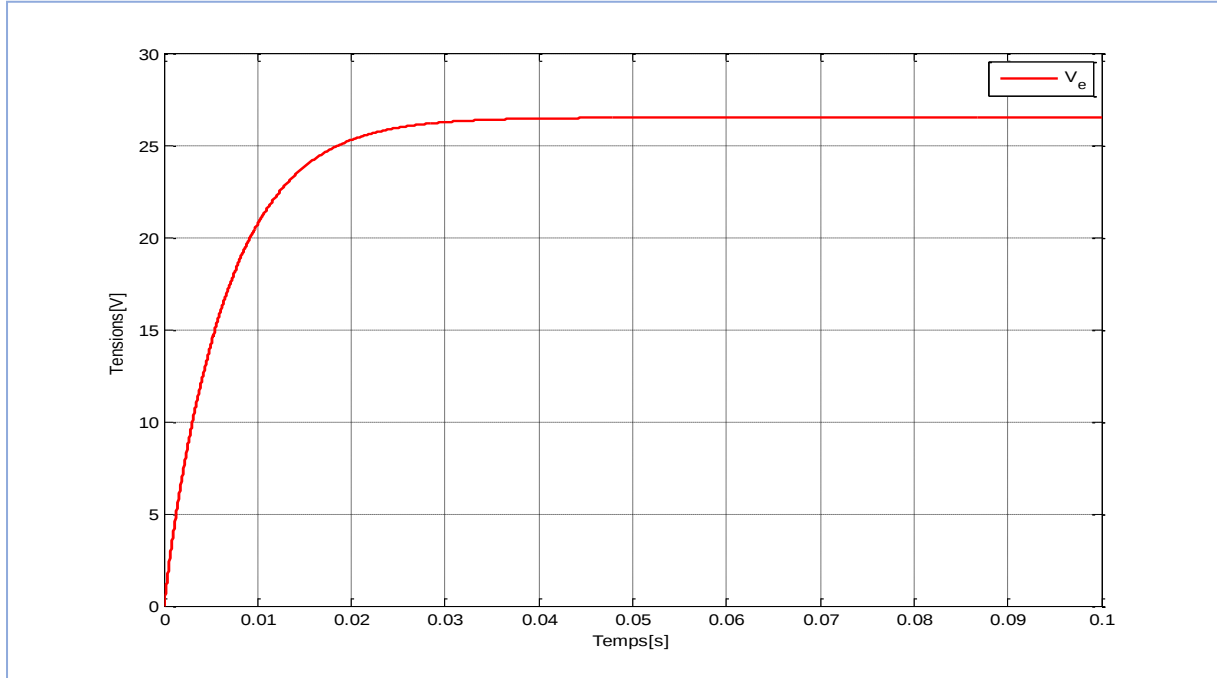


Figure 3.16: Résultats de simulation de la tension générée par le générateur photovoltaïque pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}+273.15$.

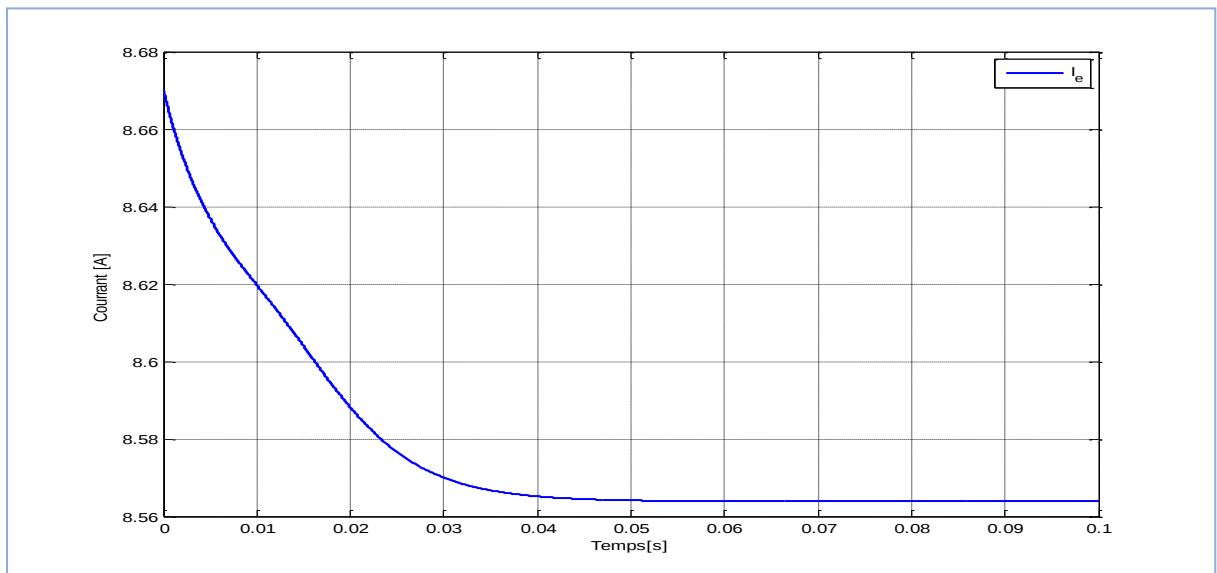


Figure 3.17 : Résultats de simulation du courant généré par le générateur photovoltaïque pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}+273.15$.

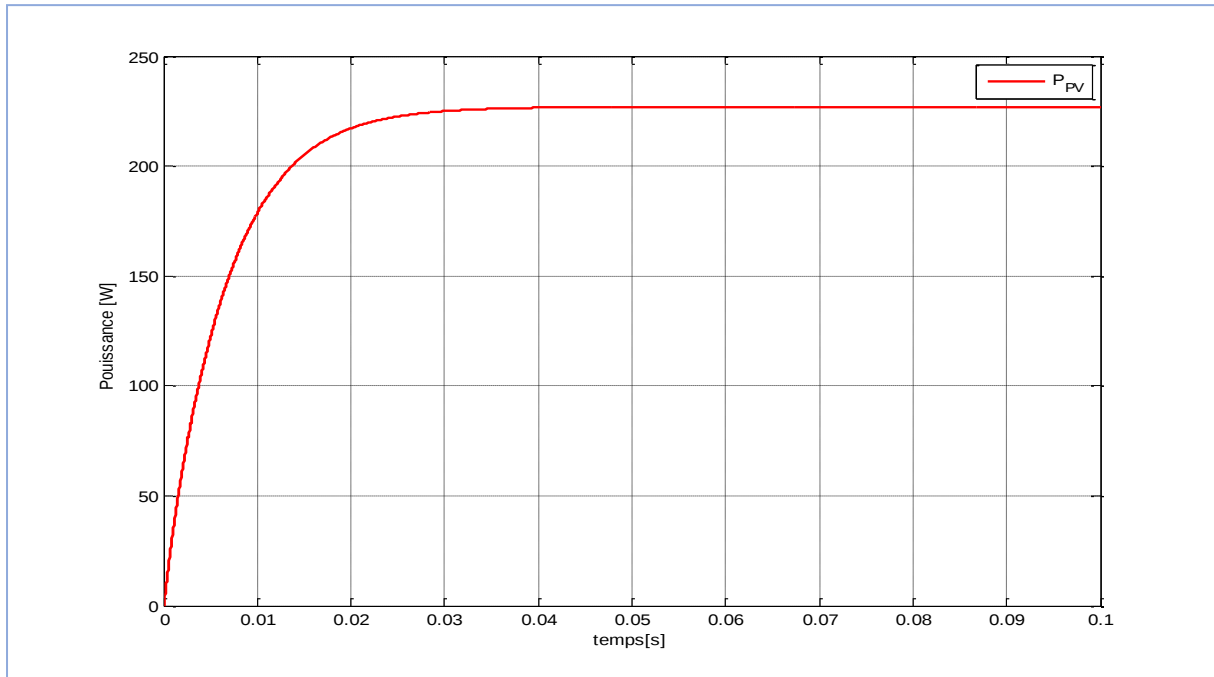


Figure 3.18 : Résultats de simulation de la puissance générée par le générateur photovoltaïque pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}+273.15$.

1.2 Résultats à la sortie du convertisseur avec MPPT:

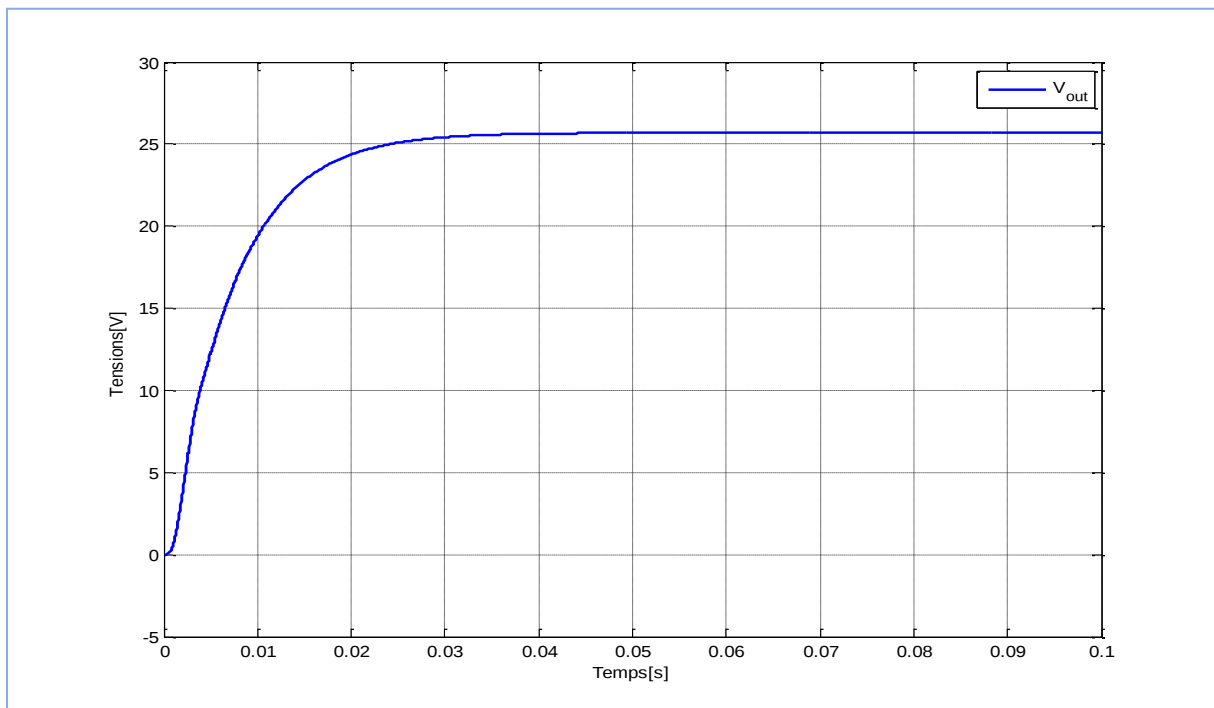


Figure 3.19: Résultats de simulation de la tension de sortie du système pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}+273.15$.

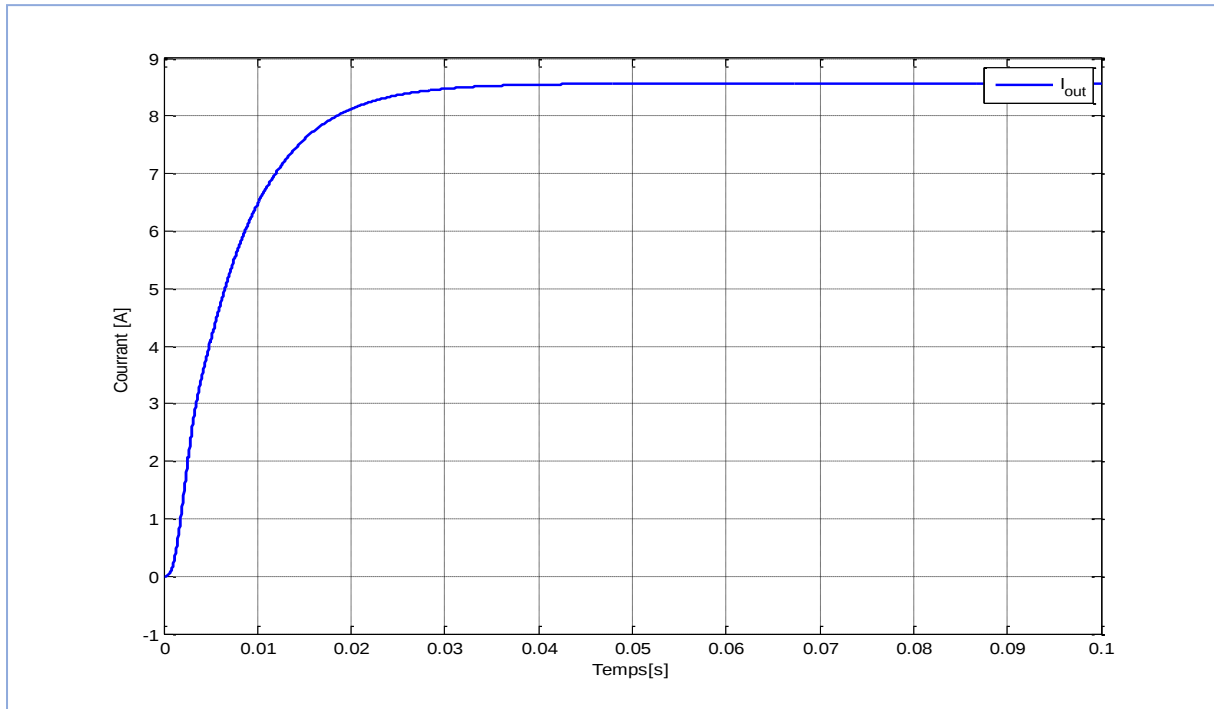


Figure 3.20 : Résultats de simulation du courant de sortie du système pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}+273.15$.

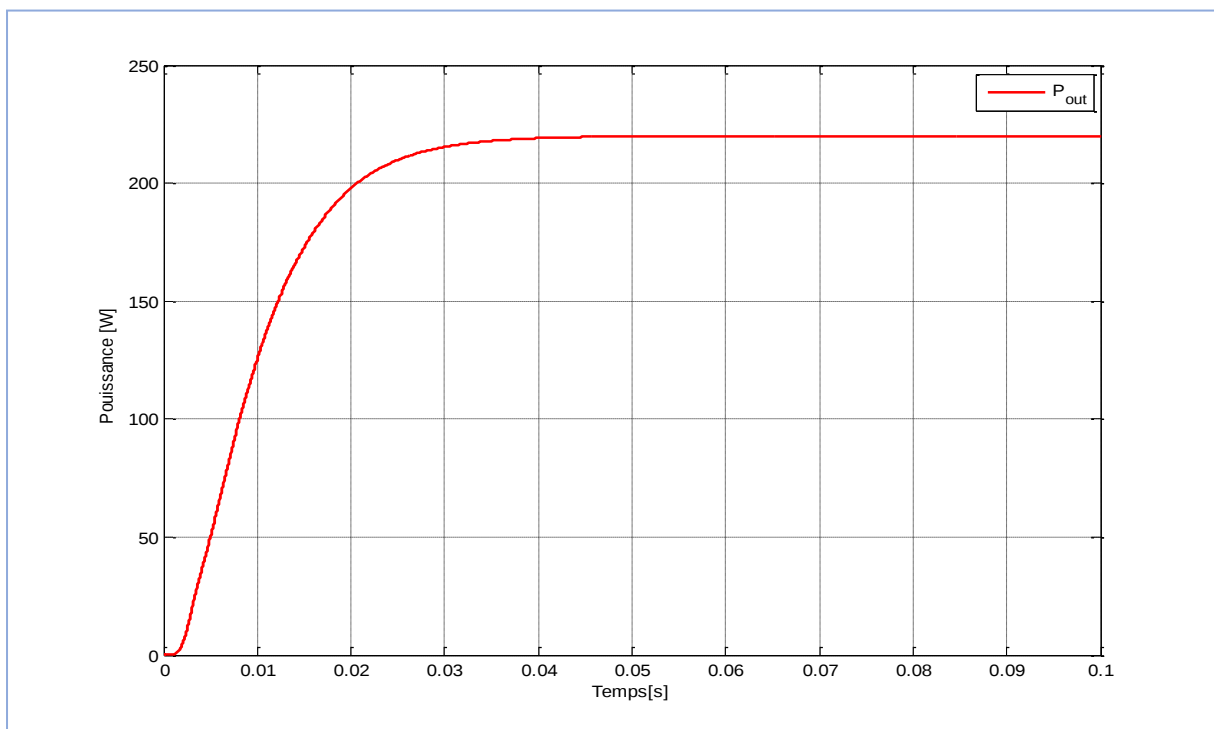


Figure 3.21 : Résultats de simulation de la puissance de sortie du système pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}+273.15$.

2. Système Photovoltaïque sous MPPT

Les résultats de simulation du système photovoltaïque sous la commande MPPT « perturbation et observation » représentent par les figures (3.19) à (3.20). Ces figures représentent la tension, le courant et la puissance générées par le générateur photovoltaïque. Ainsi, la tension, le courant et la puissance à la sortie du système photovoltaïque. Ces résultats montrent que l'hacheur survolteur sous la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles.

2.1 Résultats à la sortie du GPV sous MPPT:

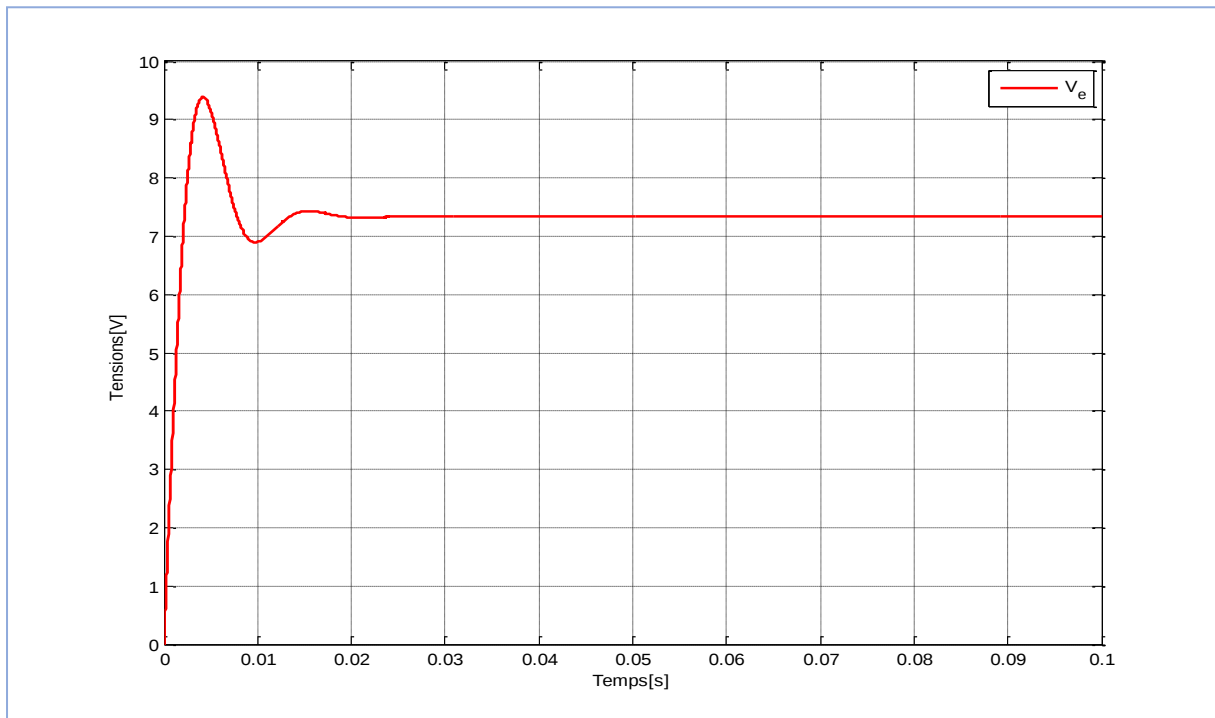


Figure 3.21: Résultats de simulation de la tension générée par le générateur photovoltaïque pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C+273.15$.

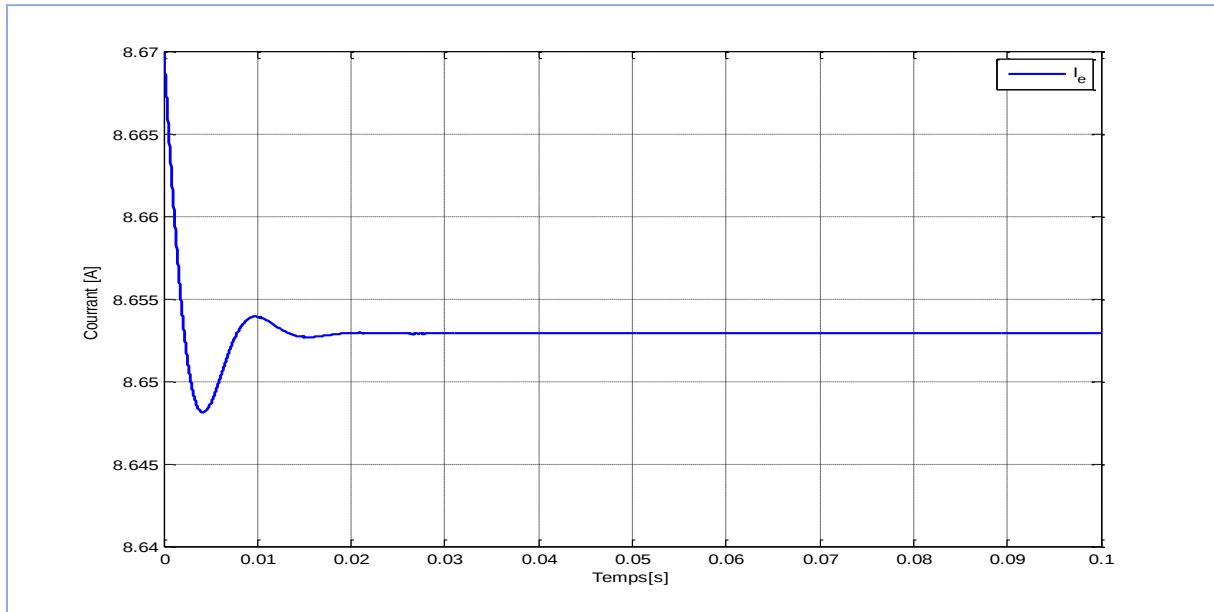


Figure 3.22: Résultats de simulation du courant généré par le générateur photovoltaïque pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}+273.15$.

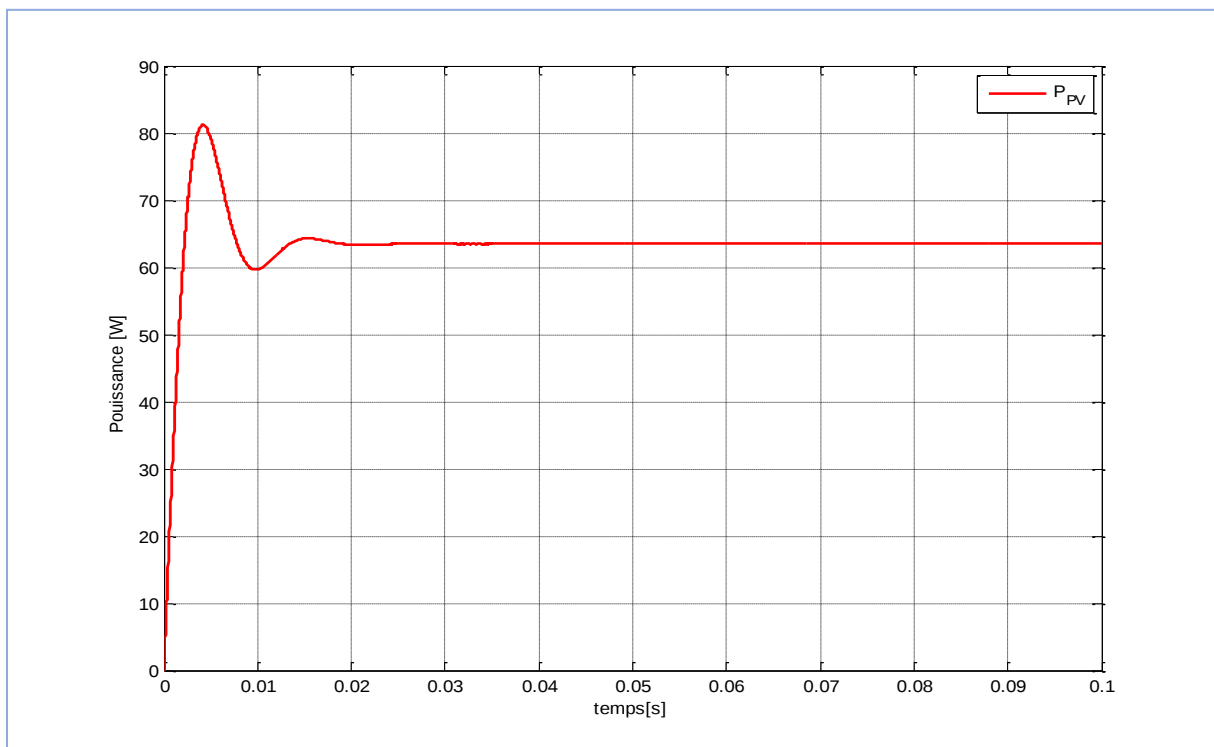


Figure 3.23: Résultats de simulation de la puissance générée par le générateur photovoltaïque pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}+273.15$.

A. Résultats a la sortie du convertisseur avec MPPT:

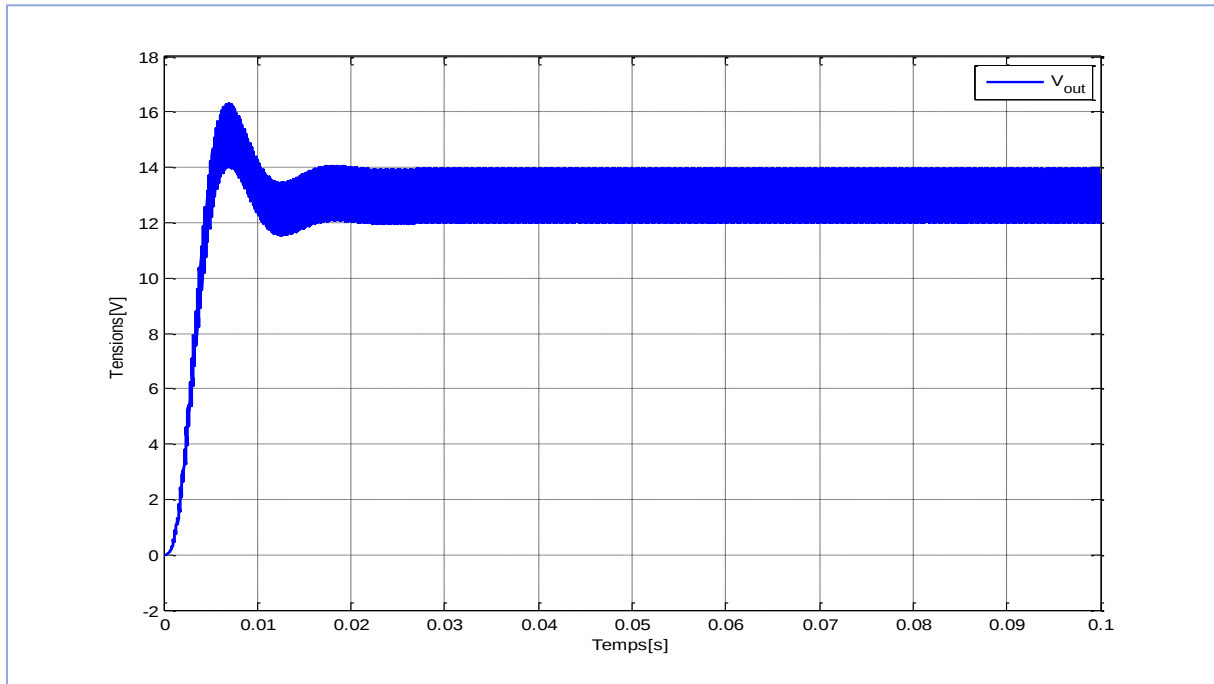


Figure 3.24 : Résultats de simulation de la tension de sortie du système pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C+273.15$.

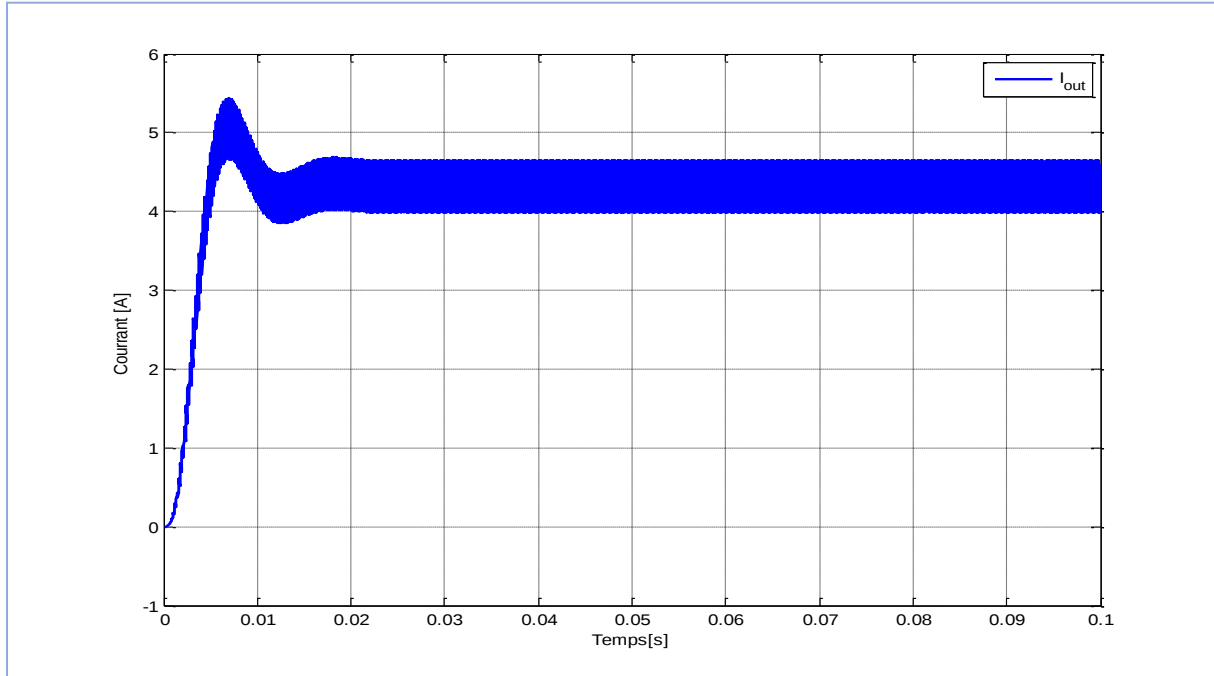


Figure 3.25 : Résultats de simulation du courant de sortie du système pour $E=1000W/m^2$ et $T=25^{\circ}C+273.15$.

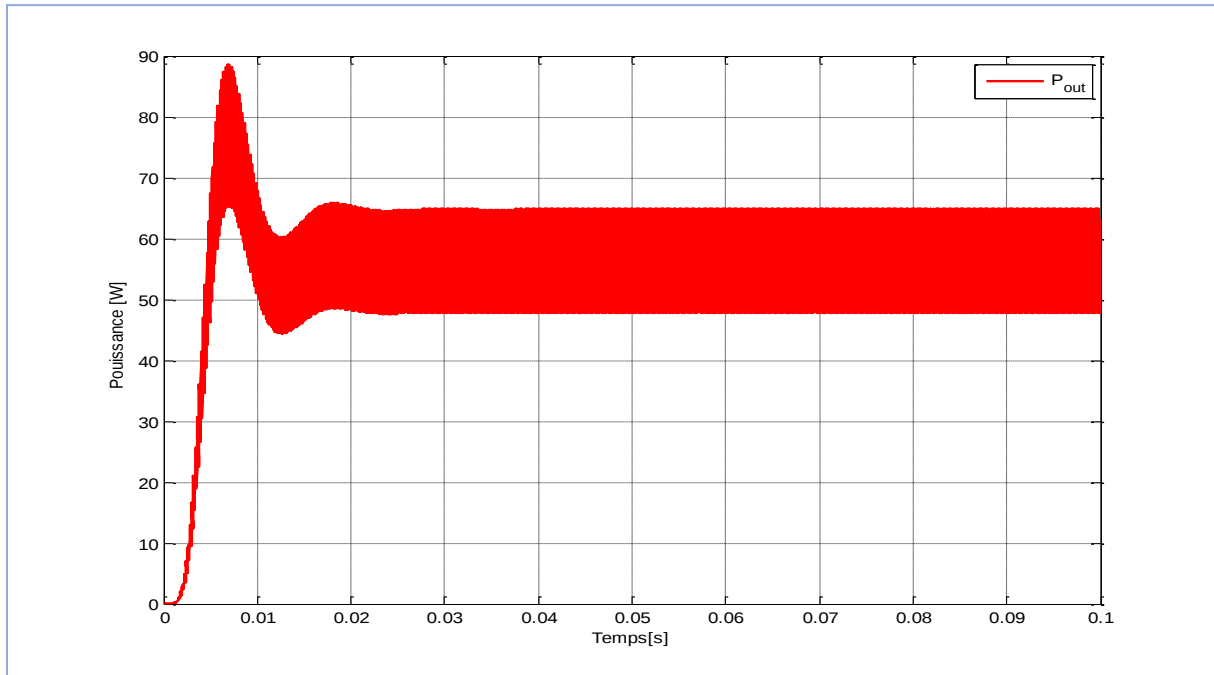


Figure 3.26 : Résultats de simulation de la puissance de sortie du système pour $E=1000\text{W/m}^2$ et $T=25^\circ\text{C}$.

D'après les résultats obtenus de la simulation, on remarque :

- A travers les courbes précédentes on remarque que la tension à la sortie du convertisseur est environ quatre fois supérieure à celle de la sortie du panneau et cela grâce au hacheur Boost qui a le rôle d'élever la tension tout en gardant la même puissance, avec une faible diminution à cause des pertes au niveau des composants et la commande utilisée.
- Ces résultats montrent que l'hacheur survolteur sous la commande MPPT « perturbation et observation » effectuent correctement leurs rôles plus performant aux systèmes photovoltaïques sous MPPT.
- Les performances du générateur PV se dégradent avec l'augmentation de la puissance. Les performances du générateur PV sont évaluées à partir des conditions standards (CST) : éclairement 1000W/m^2 température $25^\circ\text{C}+273.15$.
- Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV.
- La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge: transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

- Ensuite on remarque d'après des résultats ,l'influence du MPPT sur l'amélioration de la tension et du courant injectés au system Photovoltaïque

3.3.6 Système hybride photovoltaïque turbine connecté au réseau table de bord avion :

3.3.6.1 Résultats de la simulation système photovoltaïque connecté au réseau table de bord avion :

Les résultats de simulation du système photovoltaïque sous la commande MPPT « perturbation et observation » représentent par les figures (4.24) à (4.28). Ces figures représentent la tension, le courant et le déphasage de courant et tension entre une seule phase de réseau. . Ces résultats montrent que l'hacheur survolteur sous la commande MPPT « perturbation et observation » puissance d'une system photovoltaïque accordé aux réseaux électrique effectuent correctement leurs rôles .

Dans cette partie on simule le comportement de notre système face à une luminosité E et une température T constantes, Les conditions atmosphériques sont fixées à $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ et 1000 w/ m^2 .

Ce système était simulé et il a donné les résultats présentés dans les figures suivantes:

a) La tension de la charge est :

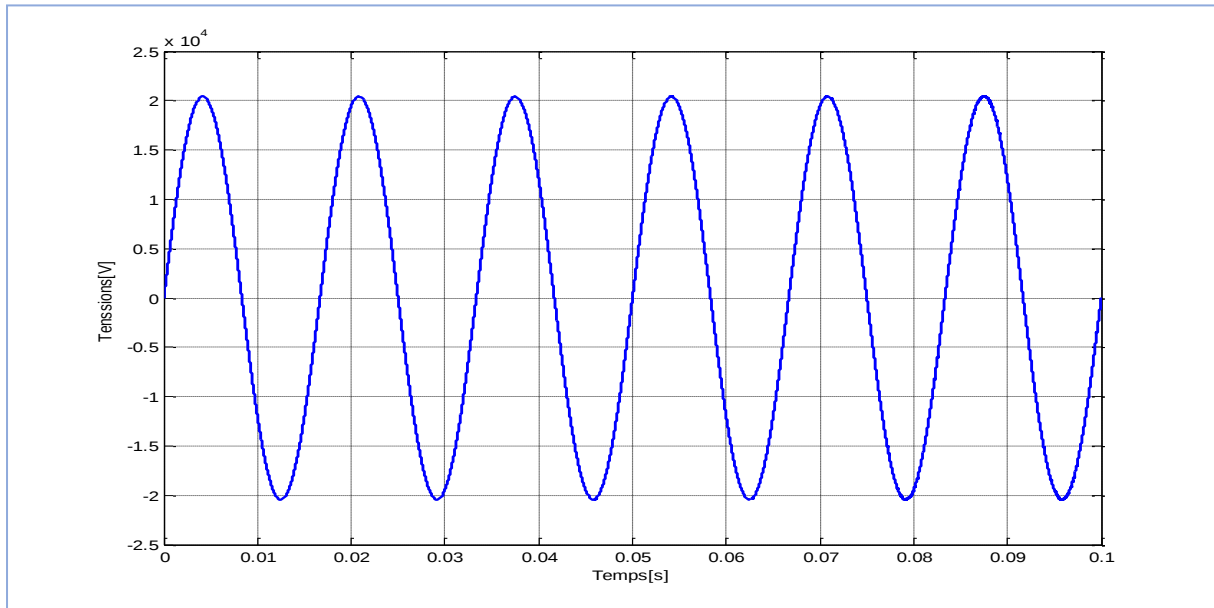


Figure 3.27 : Résultats de simulation du courant de sortie onduleur du système PV courbe de courant entre une seule phase de réseau

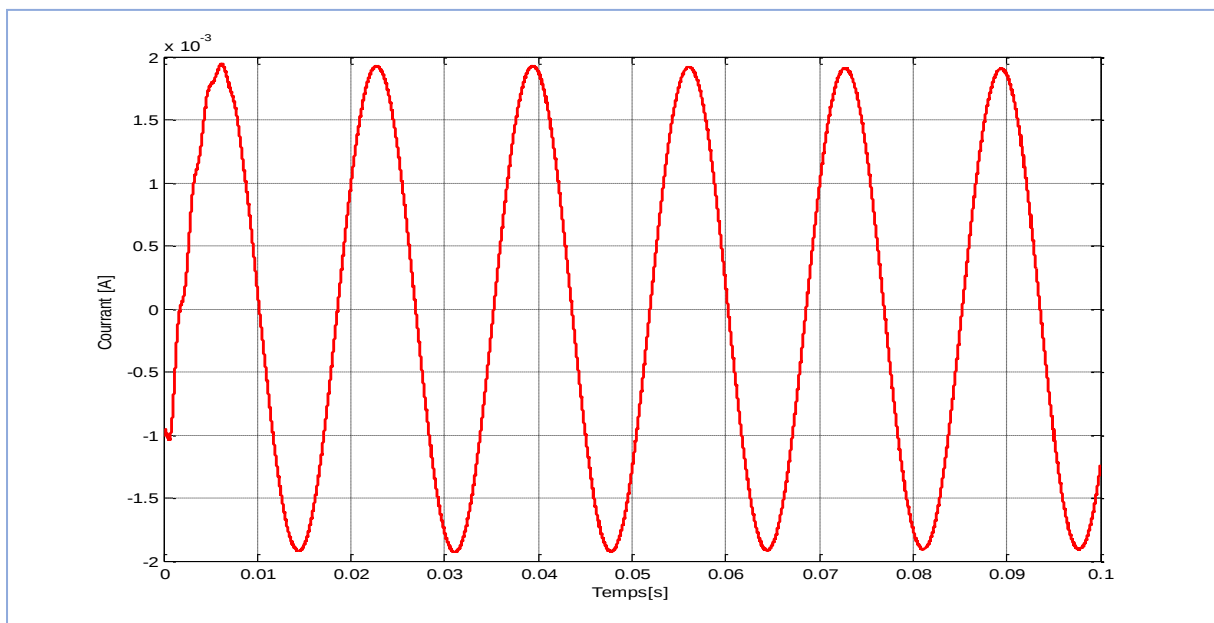


Figure 3.28 : Résultats de simulation de la tension sortie onduleur du système PV courbe de tension entre une seule phase de réseau.

Les courants de trois phases (I_a , I_b , I_c) sont illustrées dans la figure suivante :

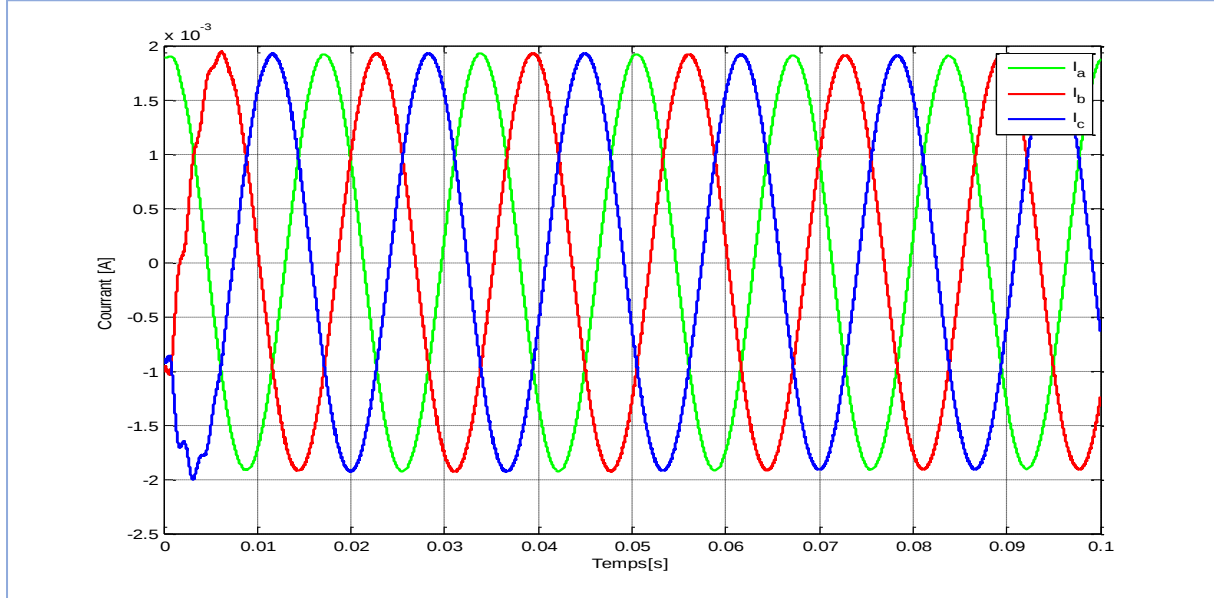


Figure 3.29 : Résultats de simulation du courant de réseau électrique 3 Φ

Les tensions de trois phases (V_a , V_b , V_c) sont illustrées dans la figure suivante :

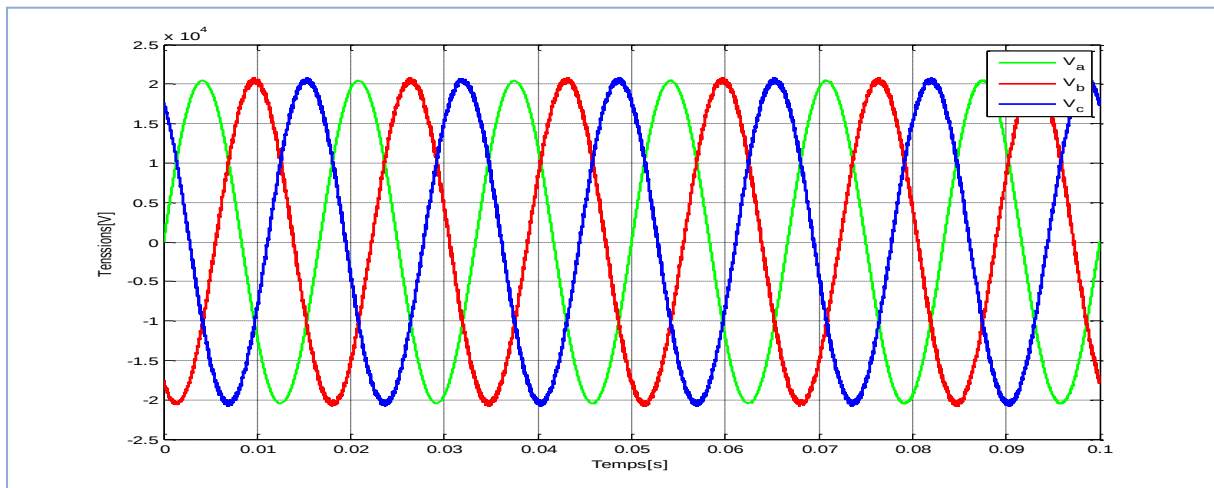


Figure 3.30 : Résultats de simulation de la tension de réseau électrique 3 Φ .

Le déphasage de courant et tension entre une seule phase de réseau sont illustrées dans la figure suivante :

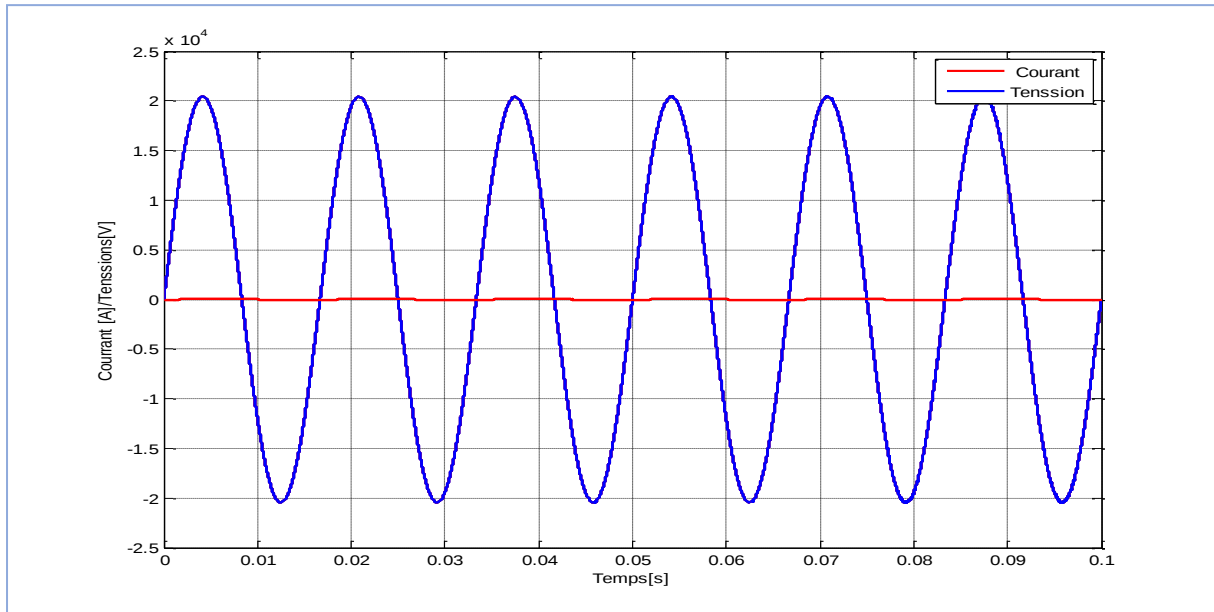


Figure 3.31 : Déphasage de courant et tension entre une seule phase de réseau.

On remarque que les courbes de courants et tension sont des courbes sinusoïdales et la figure (3.28) ne montre aucun déphasage entre le courant et la tension d'une seule phase de réseau électrique.

b) Analyse Harmoniques :

Les objectifs du convertisseurs sont achevés, à savoir la minimisation de distorsion harmonique des courants et tension générés, les figures (3.31 et 3.32) montre l'analyse spectrale des courants de sortie de la génératrice.

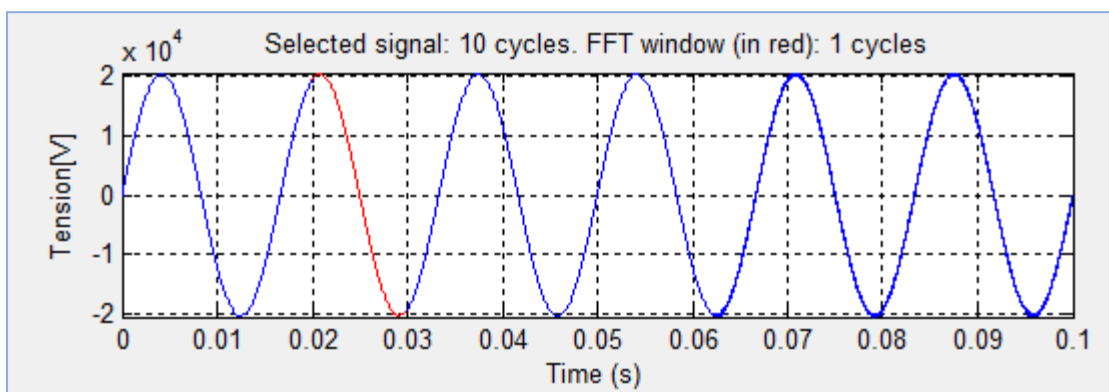


Figure 3.32 : La tension de ligne de la charge

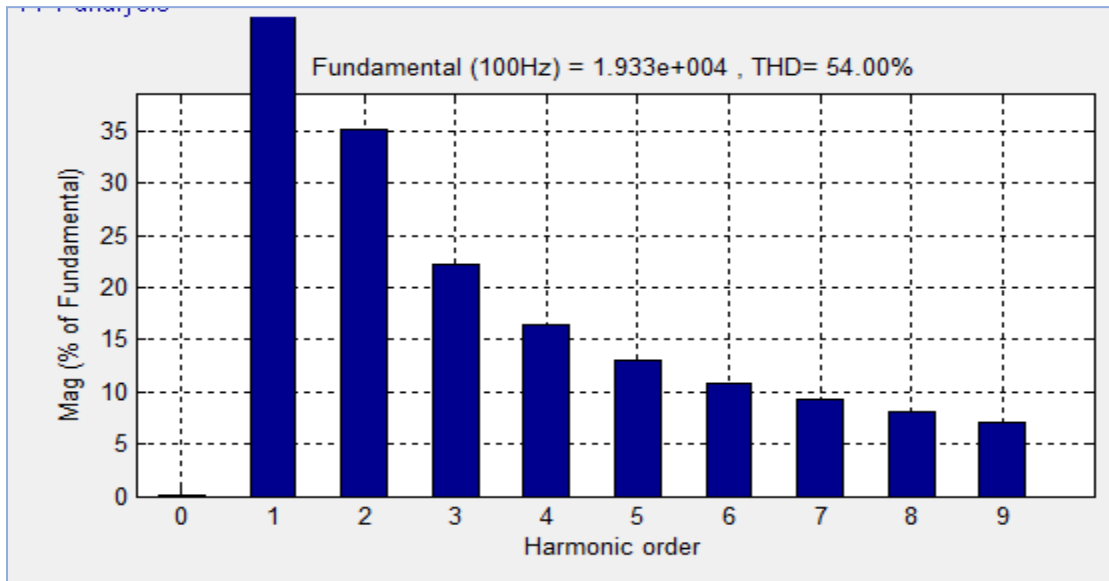


Figure 3.33: Spectre de la tension de la charge

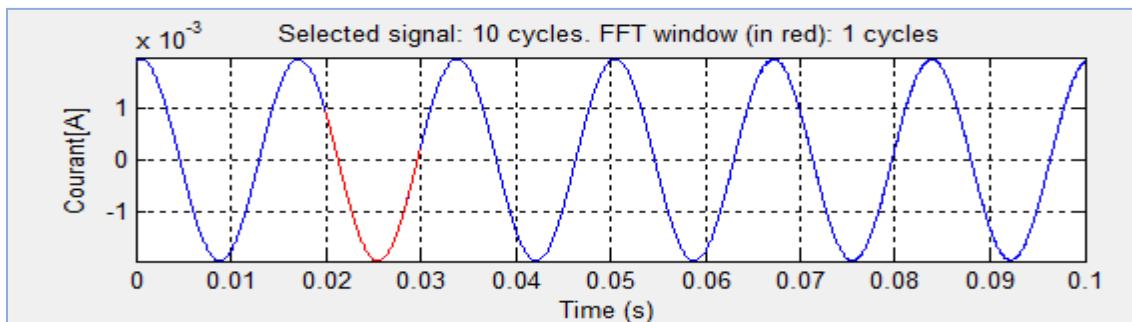


Figure 3.33: Le courant de ligne de la charge

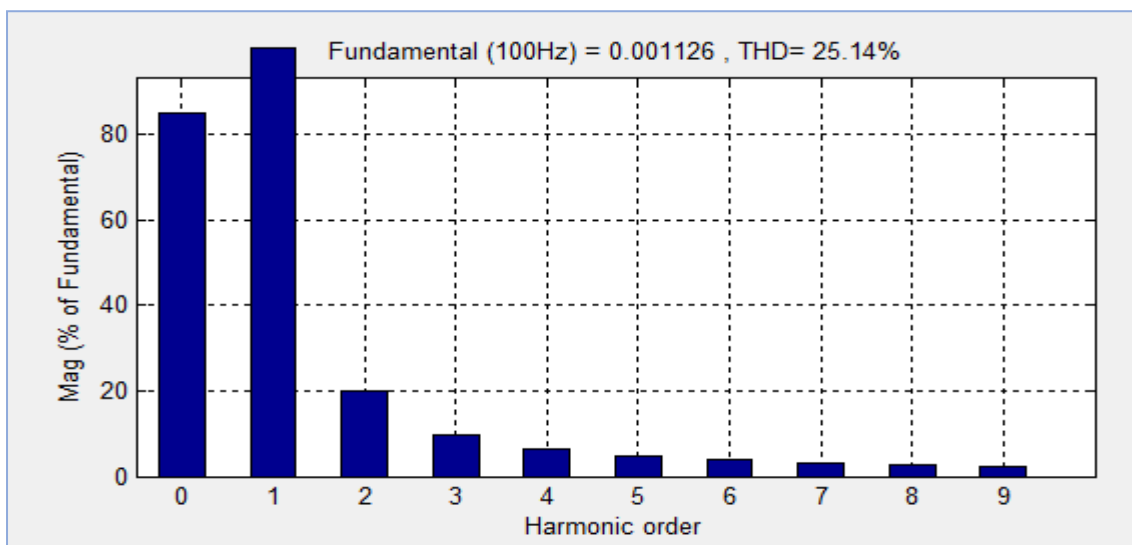
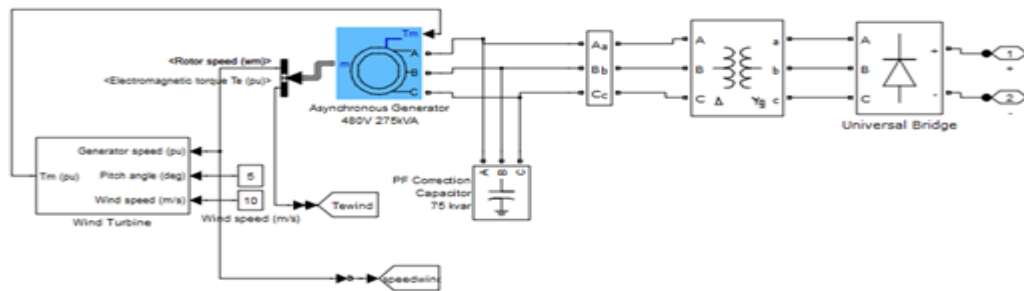


Figure 3.34 : Spectre du courant de la charge

D'après la figure (3.31 et 3.32) on observe la forme déformée de la tension et du courant injecté au réseau fourni sont sinusoïdaux et équilibrées. La mesure du THD des deux gradeurs donne pour la tension 54.00% et pour le courant 25.14%. Finalement nous pouvons conclure que ces résultats sont d'une grande importance pour la gestion de ce type système proposé.

3.3.6.2 Résultats de la simulation système hybride photovoltaïque turbine connecté au réseau table de bord avion

L'architecture de modèle de conception complète du système multi-source étudié dans le cadre de ce travail est illustrée dans la figure 3.35. Le système d'énergie hybride autonome proposé est composé de la combinaison de trois sources sous MATLAB .(a)Model simulation sous matlab (b) Model de la conception d'une turbine sous MATLAB ,



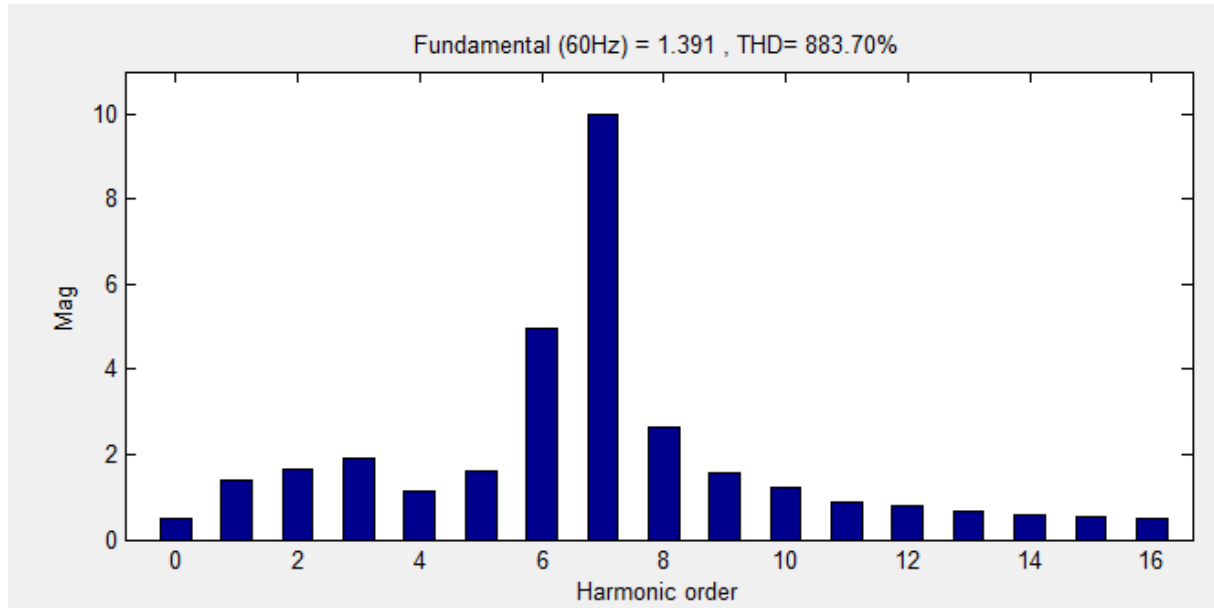


Figure 3.37: Spectre de la tension de la charge

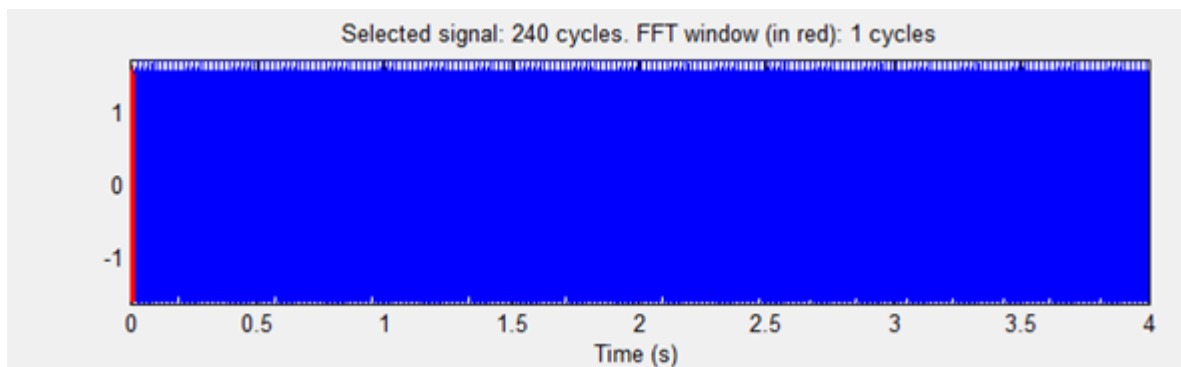


Figure 3.38: Le courant de ligne de la charge

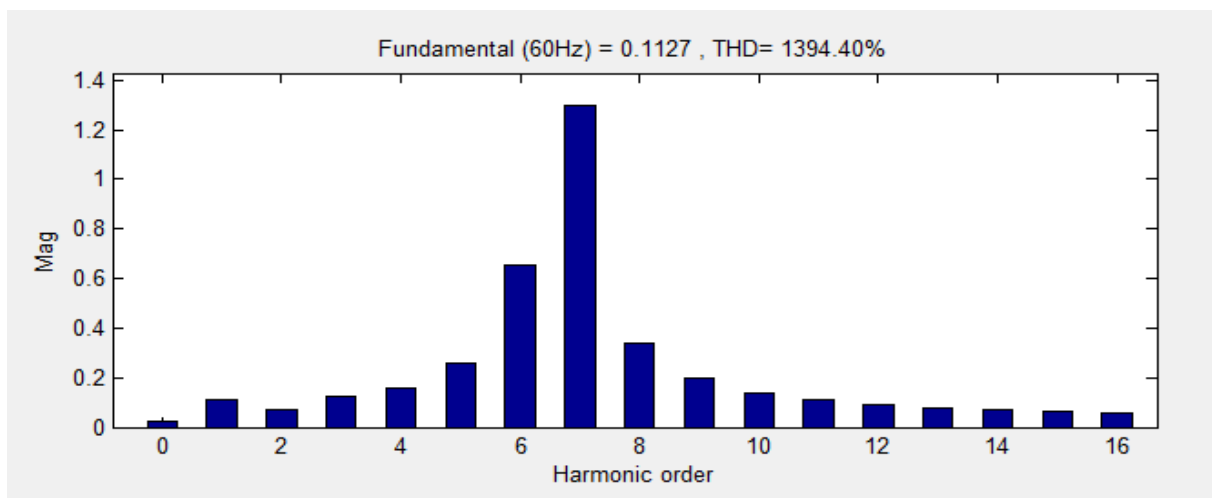


Figure 3.39 : Spectre du courant de la charge

D'après la figure (3.36 et 3.38) on observe la forme déformée de la tension et du courant injecté au réseau fourni sont sinusoïdaux et équilibrées. La mesure du THD des deux gradeurs donne pour la tension 1394 ,40% et pour le courant 883,7%. Finalement nous pouvons conclure que ces résultats sont d'une grande importance pour la gestion de ce type système proposé.

3.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, les composants proposés de système sont mis en application dans des environnements de logiciel MATLAB/SIMULINK et nous avons présenté la simulation des systèmes hybrides PV - Turbine des avions. Maintenant dans ce chapitre, nous présentons les résultats des simulations d'un système hybride photovoltaïque –turbine. La connecté au Réseau électrique BT Table avion avec l'illustration des différentes opération que subit la tension produite par le générateur PV à fin de satisfaire les besoin de la charge. Le problème des harmoniques a été présenté, l'analyse spectrale du courant et de la tension de réseau ont montré l'effet de la perturbation harmonique sur la qualité de l'énergie fournir par le GPV et les résultats de simulation ont montré l'efficacité de l'ajout d'une méthode MPPT P&O au convertisseur BOOTS et l'onduleur commandé par MLI pour améliorer la qualité de la tension et du courant injectés au réseau. Les résultats obtenus de courant et tension et la courbe de point fonctionnement maximal par la simulation sont très suffisants, et se rapprochent à ceux présentés dans la littérature.

CONCLUSION GENERALE :

CONCLUSION GENERALE :

« Étant donné la facilité avec laquelle le soleil fait sortir les gens de chez eux, on est amené à penser que l'énergie solaire pourrait faire fonctionner à peu près n'importe quoi. ».

Voici des paroles qui résument la valeur de cette énergie. Durant le dernier siècle les investigations pour trouver différents moyens de l'exploiter n'ont cessé de ramener des résultats promettant.

Le sujet traité de ce mémoire, le chargeur solaire MPPT, représente l'une de ces innovations, comportant un générateur photovoltaïque hybride turbine avion, batterie de stockages lithium-ion et un chargeur solaire. Ce mémoire aborde deux volets :

- La technologie accumulateurs de batteries comme solution pour la discontinuité.
- La commande MPPT pour l'amélioration du rendement des panneaux solaires et turbine avion et l'adaptation de l'énergie fournie par ces derniers aux batteries de stockage.
- Le système hybride commande par MPPT pour l'amélioration du rendement et l'adaptation de l'énergie fournie par ces derniers aux batteries de stockage.

L'avion plus électrique est déjà une modélisation d'une model conception avec un système hybride, il est considéré comme un moyen d'augmenter la rentabilité des avions commerciaux et de répondre aux exigences environnementales actuelles et futures, grâce aux gains et améliorations suivants :

- une meilleure rationalisation de la puissance prélevée au niveau des moteurs turbine. En effet, 400 une gestion efficace de l'énergie à bord est plus simple à mettre en œuvre avec un avion comportant un seul vecteur énergétique qu'avec un avion en possédant plusieurs.
- En effet, les progrès déjà réalisés sur des machines turbinent et des dispositifs de commande à base d'électronique de puissance laissent présager des améliorations supplémentaires dans le futur. Cette technologie est, dans le domaine aéronautique, plus récente, et possède donc des marges de progression techniques et technologiques conséquentes.

- □ Des gains de disponibilité au niveau avion et une réduction des coûts de maintenance, grâce à une détection plus facile des pannes des systèmes électriques et à la capacité réseau électrique à se reconfigurer en comparaison avec les réseaux hydrauliques.
- Pourrons-nous aller plus loin, vers un avion tout électrique, sachant que l'énergie consommée 400 durant une heure de vol en palier est plus de 400 ?

Bibliographies :

Bibliographies

- [01] L'AVION PLUS ELECTRIQUE,
ÉPREUVE'COMMUNE'DE'TIPE'2014"3'Partie'D
- [02] <http://www.solarimpulse.com/fr/the-adventure/solar-impulse>
- [03] Sadi Mohammed El Amine & Hamlat Zohra , « L'impact Des Energies Renouvelables Sur Le Réseau Electrique Ouest Algérien 220 KV »
Mémoire de de Master (LMD) Spécialité : Systeme Energetique,
Filière : Genie Electrique. Université Dr .Tahar Moulay de Saïd à
Faculté de Technologie. 2013-2014.
- [04] O. Langlois E. Foch , X. Roboam et H. Piquet. **De l'avion plus électrique à l'avion tout électrique : état de l'art et prospective sur les réseaux de bord** , J3eA, Journal sur l'enseignement des sciences et technologies de l'information et des systèmes, Volume 4, Hors-Série 1, 1 (2005) : <http://dx.doi.org/10.1051/bib-j3ea:2005601>
- [05] L'AVION PLUS ELECTRIQUE,
ÉPREUVE'COMMUNE'DE'TIPE'2014"3'Partie'D
- [06] <http://www.solarimpulse.com/fr/the-adventure/solar-impulse>
- [07] <http://www.solarimpulse.com/fr/the-adventure/solar-impulse>
- [08] Abderrahim loulou, « Lectronique De Puissance Et Commande Dans Le Système Photovoltaïque Connectés Au Réseau» Mémoire De Master, Spécialité : instrumentation et contrôle industrie DOMAINE : Science et technologie, Filière : Electronique, Université badji mokhtar – Annaba. 2017.
- [09] https://fr.wikipedia.org/wiki/Avion_solaire#
- [10] MAYOUF Somia, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec une commande vectorielle », Mémoire de master. Université Mohamed Boudiaf - M'SILA. 2016.
- [11] GHATAOUI Elmoulat & KHELIFI Houdac . « Alimentation d'un Moteur Asynchrone à partir d'un Générateur Photovoltaïque »,

Mémoire Master Filière : Electrotechnique Spécialité : Commande Electrique. 23 Juin 2019.

- [12] Hocine HAMIDI , «Etude des méthodes d'ingénierie de bandes par les alliages semiconducteurs et leur rôle en photovoltaïque ». Universite tlemcen. 2014-2015.
- [13] D Zaouk, Y Zaatar, A Khoury, C Llinares, « Electrical and optical characteristics of NAPS solar cells of Si (PiN) structure », Conference: Environment and Solar , 2000 .
- [14] Lakhdara Amira, « Etude De La Commande De La Puissance Et Stockage D'un Système Photovoltaïque »Badji Mokhtar-Annaba UniversityUniversiteBadji Mokhtar Annaba.Mémoire Master Filière Électrotechnique.2019
- [15] DEBILI Narimene,« Eude et optimisation en environnement Matlab/Simulink d'un système de pompage photovoltaïque », Mémoire de Magister en Electronique, Option: Matériaux et nanoélectronique ,Université des Frères Mentouri Constantine, 2014.
- [16] Mansour Assani Dahouénon. « Le manuel du Technicien Photovoltaïque ». Publication, programme pour la promotion des énergies renouvelables de l'électrification rurale et de l'approvisionnement durable en combustibles domestiques. (PERACOD), 2011.

- [17] Boucli-Hacene Omar , « Conception et Réalisation d'un Générateur Photovoltaïque Munie d'un Convertisseur MPPT pour une Meilleur Gestion Energétique », Mémoire de Magister, Université Abou-Bakr Belkaid, Tlemcen., 2011
- [18] Aboub Hania, « Commande d'un onduleur neuf niveaux, destiné aux fortes puissances PV », Mémoire de Magister En Électrotechnique, Option : Maitrise des Énergies, Université El-Oued, 2014.
- [19] BELKADI Nora AKLI Karima , « Thème Contrôle indirect d'un panneau solaire isolé du réseau », Mémoire de Master Domaine : Sciences et Technologies Filière : Electrotechnique Spécialité : Machines Electriques. Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou .16/09/2018.
- [20] A. MOHAMMEDI, « Contrôle par MPPT des systèmes de pompage photovoltaïque », Thèse de doctorat en commende et conversion d'énergie Université A. Mira de Bejaia, 2015.
- [21] S. AISSOU, « Caractérisation et optimisation de puissance des systèmes photovoltaïques», Thèse de doctorat Université A. Mira Bejaïa, Mai 2016.
- [22] Arnaud Sivert, « Panneaux Photovoltaïques Etude d'une valise solaire », IUT Génie Electrique & Informatique Industriel de Soissons. Iutenligne, le catalogue de ressources de l'enseignement technologique universitaire.12 mars 2019.

- [23] NAKOUL Zakia, « Optimisation D'une Centrale Solaire A Base D'un Generateur PV [Application Aux Sites Tlemcen Et Bouzaréah] », Mémoire de magister. Université Abou BakrBelkaid Tlemcen. 2010.
- [24] Benlahreche Housseem Eddine , « Etude et optimisation d'un Système de pompage Photovoltaïque » Mémoire de Master , Université Mentouri - Constantine Faculté des Sciences de L'ingénieur département Electrotechnique. Juin 2012.
- [25] A. BELHOCINE et S.ZAIDI, «Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome » Mémoire de Master. Université de Bejaïa, 2012.
- [34] Dr.F.Bouchafaa, « Cours Électronique de puissance », [http : //www.usthb.com](http://www.usthb.com), 2008/2009.
- [35] Emmanuel PINAULT-BIGEARD, Cours : Convertisseurs Statiques. CPGE PTSI/PT - Sciences Industrielles De l'Ingenieur. Lycée Jean Zay - Thiers. S2i. Pinault-Bigeard. Com.
- [36] Yacini Lounis. « Etude Et Simulation D'un Convertisseur Electrique Interconnecte Au Réseau Conventionnel » Mémoire De Master Professionnel. Filière : Génie électrique Spécialité: Automatique et Informatique Industrielles Faculté Du Génie Electrique Et D'informatique. Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou. 2015/2016.
- [37] C. bernard, C. sebrao, O. bernardlaval, C.vaudouer «Gestion énergétique des panneaux photovoltaïques» université de Sfax école nationale d'ingénieurs de Sfax, 2008-2009.
- [38] Boucheritte Wafa, « Convertisseurs multi niveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau », Mémoire de Magister en Électrotechnique, Option Énergies renouvelables, Université Mohamed Khider, Biskra, 2013.

- [39] NDIAYE Papa Amadou et KAWTHER Achari « Production d'énergie électrique à partir d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master Académique. Domaine : Sciences et Technologie, Filière: Électro mécanique, Spécialité: Electromécanique, Université 8 Mai 1945 – Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie. 2019.
- [40] A.P. Malvino, D.J. Bates, Électronique Principales, (McGraw-Hill, 2016).
- [41] L. Lasne, Electronique de puissance, (Dunod, 2015).
- [42] Zerdoudi A., Chenni R., ‘ ‘ Etude De L'influence Des Différents Paramètres Sur Un Module Photovoltaïque ’ ’, Sciences & Technologie A – N°41, Juin 2015, 49-54.
- [43] Benhaddouche Nesrine Fatim, « La Commande D'un Système Photovoltaïque D'un Satellite », Mémoire de Master en Automatique : contrôle de processus, Université Abou Bekr Belkaïd -Tlemcen, 2011.
- [44] Meddah M., Bourahla M., Bouchetata N., ‘ ‘ Synthèse des convertisseurs statiques dc/ac pour les systèmes photovoltaïques. Revue des Energies Renouvelables, ICESD'11 Adrar 2011.
- [45] ABID Ayoub & BECHLAGHEM Yassine, « Etude et dimensionnement d'un convertisseur SEPIC pour une application photovoltaïque », Mémoire de Master académique, spécialité électrotechnique, option : Réseaux électriques et réseaux électriques intelligents, Université Abou Bekr Belkaïd, Tlemcen, 2017. 98.
- [46] BELKACEM Mourad, « Etude et optimisation du transfert d'énergie électrique en conversion photovoltaïque par la recherche du point de puissance maximale (MPPT) », Mémoire de Master, Spécialité : Matériaux, Systèmes et Energies Renouvelables, Université Abou Bekr Belkaïd Tlemcen, 2015.
- [47] NETTARI Yakoub, « Commandes robustes et intelligentes des convertisseurs DC-DC », Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université Ferhat Abbas Sétif, 2014.
- [48] AIT-CHEIKH, SALAH MOHAMED, « Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes

- photovoltaïques », Thèse d'État : Électronique, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2007.
- [49] L. Protin, « Convertisseurs photovoltaïques », Technique de l'ingénieur, traité génie Électrique 2001.
- [50] Méchalikhe Med Nadjib & Hamada Charaf Eddine, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau », Mémoire de Master Académique, Domaine : sciences et technologies Filière : Génie électrique, Spécialité: Machine électrique et électronique de puissance, Université Kasdi Merbah–Ouargla, 2013.
- [51] Ionel Vechiu, « Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome », Thèse de doctorat, Discipline : Electronique, Electrotechnique et Automatique Spécialité : Génie Electrique l'université du havre, Paris, 2005.
- [52] Othmane BENSEDDIK &Fathi DJALOU, « Etude et optimisation d'un système photovoltaïque », Mémoire de Master, Spécialité : Génie électrique et électronique, Option : Automatique, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2012.
- [53] Ziani Seyfeddine & Ould Mammar Mohamed « Etude et simulation d'un hacheur Boost pour suivre le point de puissance maximal (MPPT) ». Mémoire de Master Mention Électronique Microsystèmes et microélectronique et conception de circuits, Université Saad dahlab de Blida. 2016-2017.
- [54] Meddah Mohamed, « Synthèse des convertisseurs statique DC/DC/AC pour les systèmes photovoltaïques : Etudes et Simulation », mémoire de Magister Spécialité : Génie Electrique, Ecole doctorale: commande industriel des entrainements, Université de science et de technologies d'Oran.
- [55] Abderrahim loulou, « LECTRONIQUE De Puissance Et Commande Dans Le Système Photovoltaïque Connectés Au Réseau» Mémoire De Master, Spécialité : instrumentation et contrôle industrie DOMAINE : Science et technologie, Filière : Electronique, Université badji mokhtar –Annaba. 2017.
- [56] ECEN497/5797 intro to Power Electronics ece.coloradoedu/NECEH5797.