

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Abderrahmane Mira- Bejaia
Faculté de Technologie
Département de Génie électrique



Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme de master

Filière : Electrotechnique

Option : Energies renouvelables en électrotechnique

Thème

**Étude et Conception des Onduleurs Monophasés
Photovoltaïques Connectés et Non-Connectés au Réseau**

Présenté par :

DAHMANE Sonia

MEDDOURENE Sabrina

Encadré par :

Pr. REKIOUA Toufik

M. IHAMOUCHE Syphax

**Année Universitaire
2024/2025**

REMERCIEMENT

Au terme de ce travail, c'est avec émotion que nous tenons à remercier tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce projet.

Nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères à notre promoteur, Monsieur le Professeur **REKIOUA Toufik**, qui nous a permis de bénéficier de la qualité de son encadrement, les conseils qu'il nous a prodigués, la patience et la confiance qu'il nous a témoignées.

Nous remercions également le M. **IHAMMOUCHEN Syphax** pour sa disponibilité, ses conseils avisés et son encadrement rigoureux qui ont grandement contribué à l'aboutissement de ce mémoire.

Nous tenons à remercier l'ensemble des membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner notre travail, pour avoir accepté de donner une partie de leur précieux temps et d'avoir ainsi partagé une partie de leur savoir. Leurs regards critiques ne sauront que rehausser le niveau de notre savoir-faire.

Nos remerciements vont vers tous les enseignants et les intervenants du Master Génie électrique de l'université Abderrahmane MIRA de Bejaia pour l'ensemble de leurs enseignements.

Nos remerciements s'adressent aussi à toutes personnes ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail en créant une certaine ambiance qui nous a fait oublier la fatigue et renouveler le souffle à chaque fois.

Merci

Dédicaces

Je dédie ce travail à ceux qui occupent une place particulière dans ma vie.

À mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien constant.

A mes frères et sœurs, pour leur présence, leur affection et leurs encouragements.

À mon fiancé **Kamel**, pour sa compréhension, sa patience et ses encouragements tout au long de ce parcours.

À tous mes amis pour leur amitié sincère, leur confiance et leur appui précieux.

Sonia

Dédicaces

Avec une profonde émotion et une gratitude infinie,
Je dédie ce mémoire à celles et ceux qui ont toujours cru en moi,
Qui ont été ma force dans les moments de doute,
Ma lumière dans les instants d'incertitude.

À mon cher père **Meddourene Mabrouk**, dont les sacrifices, le courage et le soutien
inébranlable m'ont guidée tout au long de ce parcours.

À ma tendre mère **Chabouni Messaad**, dont l'amour inconditionnel, les prières silencieuses
et l'encouragement constant ont été mon pilier.

À ma sœur bien-aimée **Assia**, pour sa douceur, sa patience et sa présence rassurante.

À mes frères **Mounir** et **Sofiane**, pour leur confiance, leurs conseils et leur appui indéfectible.

À ma belle-sœur **Kahina**, pour sa gentillesse, sa compréhension et son soutien généreux.

À mes précieuses nièces **Elina** et **Nourcine**, véritables rayons de soleil dans ma vie.

À mes amies fidèles, **Fella** et **Charinez**, à ma précieuse amie **Didouche**, ainsi qu'à ma chère
binôme **Dahmane Sonia**, pour leur amitié authentique, leur soutien attentif et leur présence
indéfectible tout au long de ce parcours.

À **Syfax**, d'une grande générosité, pour ses conseils avisés, sa disponibilité et son aide
précieuse tout au long de ce travail.

Sabrina

Table des matières

Étude et conception des onduleurs monophasés photovoltaïques connectés et non-connectés au réseau	1
Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Généralité sur l'Energie photovoltaïque et les onduleurs	3
I.1. Introduction à l'énergie renouvelable	4
I.2. Applications du photovoltaïque	4
I.3. Classification d'un système solaire photovoltaïque.....	5
I.3.1. Système autonome	5
I.3.1.1. Les systèmes autonomes avec stockage.....	5
I.3.1.2. Les systèmes autonomes sans stockage	6
I.3.2. Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau.....	6
I.3.3. Les systèmes hybrides raccordés au réseau	7
I.4. Les convertisseurs statiques.....	7
I.4.1. Définition d'un convertisseur statique	8
I.4.2. Composants de puissance du convertisseur de puissance électrique	9
I.4.3. Avantages et inconvénients des convertisseurs	10
I.4.4. Les principales applications	10
I.5. Les convertisseurs DC/DC (Hacheurs)	11
I.5.1. Convertisseur DC/DC dévolteur (buck).....	12
I.5.2. Convertisseur DC/DC survolteur (boost).....	12
I.5.3. Convertisseur DC/DC dévolteur- survolteur (boost-buck)	13
I.5.4. Domaine d'utilisation des hacheurs	14
I.6. Les convertisseur DC/AC (Onduleurs)	14
I.6.1. Classification des onduleurs photovoltaïque	14
I.6.1.1. Le nombre de phases de la charge	15
I.6.1.2. La nature de la source	16
I.6.1.3 La structure du convertisseur DC-AC.....	17
I.6.2 Les applications des onduleurs	17
I.7 Problématiques liées à l'intégration des énergies renouvelables	18
I.7.1 Variabilité et incertitude de la production	18
I.7.2 Faible capacité de maintien en cas de défaut (Fault Ride Through).....	18
I.7.3 Qualité de l'énergie injectée	18
I.8 Applications des ENR connectées au réseau	18

I.9 Règles de connexion des ENR au réseau	19
I.10 Normes et standards internationaux	19
I.10.1 Normes techniques.....	19
I.11 Classification des onduleurs photovoltaïques connectés au réseau	19
I.10.1. Onduleur centrale.....	20
I.11.2. Onduleur de chaîne (<i>String Inverter</i>)	21
I.11.3. Onduleur intégré au module (micro-onduleur)	21
I.11.4. Onduleur à multi-chaines	22
I.12 Conclusion	23
Chapitre II : Dimensionnement et Modélisation de la Chaîne de Conversion Photovoltaïque	23
II.1 Introduction	24
II.2 Partie I : Système photovoltaïque	24
II.2.1 Modèle de la cellule photovoltaïque.....	24
II.2.2 Modèle du convertisseur DC/DC survolteur (boost).....	26
II.2.2.1 Principe de fonctionnement	26
II.2.2.2 Le modèle moyen du Boost	27
II.2.2.3 Sélection des composants du Boost.....	28
II.2.3 Simulation de la partie I.....	28
II.2.3.1 Description du système.....	28
II.2.3.3 Résultats et discussions	30
II.3 Partie II : onduleur.....	32
II.3.1 Modèle de l'onduleur et le filtre	32
II.3.2 Sélection des paramètres du filtre LC (non-connecté)	33
II.3.3 Sélection des paramètres du Filtre LCL amorti et non-amorti (connecté)	33
II.3.3.1 Critères de conception du filtre	33
II.3.3.2 Sélection de l'inductance L_1 (côté onduleur).....	34
II.3.3.3 Sélection de l'inductance L_2 (côté réseau).....	34
II.3.3.4 Sélection de la capacité du filtre C_f	34
II.3.3.5 L'amortissement critique (pour le filtre LCL amorti)	34
II.3.4 Simulation partie II.....	34
II.3.4.1 Commande de l'onduleur	34
II.3.4.2 Description du système.....	35
II.3.4.3 Techniques de modulation des onduleurs.....	36
II.3.4.3.1 Commande pleine onde (180°)	36
II.3.4.3.2 Commande décalé (120°)	37

II.3.4.4 Modulation MLI	37
II.3.4.4.1 MLI bipolaire.....	37
II.3.4.4.2 Les avantages et inconvénients.....	38
II.3.4.4.3 Interprétation des résultats.....	39
II.3.4.4.4 MLI unipolaire.....	40
II.3.4.4.5 Les avantages et inconvénients.....	40
II.3.4.4.6 Interprétation des résultats.....	42
II.4 Conclusion.....	42
Chapitre 03 : Systèmes photovoltaïques - installations autonomes et connectées au réseau électrique	44
III.1 Introduction	44
III.2 Partie I : système photovoltaïque non connecte au réseau électrique	44
III.2.1 Description du système	44
III.2.2 L'approche de contrôle utilisée	45
III.2.2.1 Commande en tension de l'onduleur.....	45
III.3 Partie II : système photovoltaïque connecte au réseau électrique	46
III.3.1 Description du système	46
III.3.2 Boucle de verrouillage de phase (PLL).....	46
III.3.3 L'approche de contrôle employée	47
III.3.3.1 Commande en courant de l'onduleur	47
III.3.4 Etude de filtre LCL amorti et non amorti.....	47
III.4 Résultats et interprétations	50
III.4.1 Cas I : système photovoltaïque non-connecte au réseau électrique	50
III.4.2 Cas II : système photovoltaïque connecté au réseau	53
III.4.2.1 Comparaison entre filtre LCL amorti et non-amorti	53
III.5 Conclusion.....	57
Bibliographie.....	60

Liste de figures

Chapitre I

Figure I. 1 Les différent type des énergies renouvelables.....	4
Figure I. 2 : Classification des systèmes photovoltaïques.....	5
Figure I. 3 : Les systèmes autonomes avec stockage.	6
Figure I. 4 : Schéma de principe d'une installation photovoltaïque raccorde au réseau.	7
Figure I. 5 Schéma d'une installation type d'un système hybride.	7
Figure I. 6 : Les différents types de Convertisseurs statiques.....	8
Figure I. 7 : Quelques domaines d'application des composants de puissance. [10].....	10
Figure I. 8 : Schéma de principe de l'hacheur.....	11
Figure I. 9 : Schéma de principe d'un hacheur série.....	12
Figure I. 10 : Schéma d'un hacheur survolteur.....	13
Figure I. 11 : Circuit équivalent d'un hacheur BUCK-BOOST.	13
Figure I. 12 : Schéma explicatif d'un convertisseur DC/AC (Onduleur).....	14
Figure I. 13 : Onduleur monophasé.....	15
Figure I. 14 : Structure d'un onduleur triphasé.	16
Figure I. 15 : Onduleur de tension.....	16
Figure I. 16 : Onduleur de courant.	17
Figure I. 17 : Onduleurs centraux.[12].....	20
Figure I. 18 : Topologie d'un onduleur de chaînes. [12].....	21
Figure I. 19 : Onduleur intégré au module. [12].....	22
Figure I. 20 : Onduleurs multi-chaînes. [12].....	23

Chapitre II

Figure II. 1 : Schéma équivalent d'une cellule PV modèle à une diode.	24
Figure II. 3 : schéma électrique d'un convertisseur Boost.	26
Figure II. 4 : les états de fonctionnement du Boost suivant l'état de l'interrupteur S.	27
Figure II. 5 : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Boost.	27
Figure II. 6 : Chaîne de conversion PV.	29
Figure II. 7 : schéma de technique de MPPT.	29
Figure II. 8 : Organigramme de l'algorithme de la technique PO [16].	30
Figure II. 9 : Caractéristique du PV sous irradiations variable et température fixe.	30
Figure II. 10 : Caractéristique du PV sous température variable et irradiations fixe.	31
Figure II. 11 : l'allure de puissance et tension de la charge.	31
Figure II. 12 : l'allure de puissance et tension de PV.	32
Figure II. 13 : Technique de modulations des onduleurs.	35
Figure II. 14 : Onduleur non connecte au réseau.	36
Figure II. 15 : Commande pleine onde (180°) de l'onduleur monophasé.....	36
Figure II. 16 : Commande décale (120°) de l'onduleur monophasé.	37
Figure II. 17 : Schéma fonctionnel du principe de la MLI bipolaire.....	37
Figure II. 18 : l'allure de tension de l'onduleur.	38
Figure II. 19 : l'allure de courant et tension de la charge.....	38

Figure II. 20 : Spectre harmonique de courant.....	39
Figure II. 21 : Schéma fonctionnel du principe de la MLI unipolaire.....	40
Figure II. 22 : l'allure de tension de l'onduleur.	41
Figure II. 23 : l'allure de tension et courant de la charge.....	41
Figure II. 24 : allure de spectre harmonique du courant présente.	41

Chapitre III

Figure III. 1 Schéma fonctionnel de la chaine de conversion photovoltaïque non-connecte au réseau.....	45
Figure III. 2 Diagramme fonctionnel de la commande en tension d'un onduleur	45
Figure III. 3 schéma fonctionnel de la chaine de conversion photovoltaïque connecté au réseau	46
Figure III. 4 Boucle de verrouillage de phase PLL	46
Figure III. 5 commande en courant de l'onduleur.....	47
Figure III. 6 schéma de filtre LCL non-amorti.....	48
Figure III. 7 schéma de filtre LCL amorti	49
Figure III. 8 Allures de tension et de courant de charge.	50
Figure III. 9 THD avant et après la variation de la charge R (non-connecté).....	50
Figure III. 10 Allures de tension et courant avant et après la variation de charge.....	51
Figure III. 11 THD avant et après la variation de la charge RL (non-connecté).....	51
Figure III. 12 le tracé de Bode du filtre LCL avec et sans amortissement.....	53
Figure III. 13 Courbe de puissance active et réactive filtre non-amorti.....	53
Figure III. 14 THD du courant de réseau sous un filtre non-amorti.....	54
Figure III. 15 Courbe de puissance active et réactive filtre amorti	54
Figure III. 16 THD du courant de réseau sous un filtre amorti	55
Figure III. 17 Allure de tension et courant du réseau	55
Figure III. 18 Taux de distorsion harmonique lors de la connexion au réseau	56

Liste de tableau

Chapitre I

Tableau I. 1 : Comparaison des éléments de l'électronique de puissance	9
--	---

Chapitre II

Tableau II. 1 caractéristiques de module Soltech 1StH-215-P.....	26
--	----

Chapitre III

Tableau III. 1 Comparaison des Performances avec charge R et charge RL	51
Tableau III. 2 Comparaison des Performances avec et sans amortissement	55

Introduction Générale

La transition énergétique mondiale impose aujourd'hui un recours croissant aux énergies renouvelables, et parmi elles, l'énergie photovoltaïque occupe une place de choix. Exploitant une source d'énergie inépuisable et propre, le photovoltaïque s'impose comme une solution durable pour la production d'électricité. Cependant, cette énergie, produite sous forme de courant continu (DC) par les panneaux solaires, doit être convertie en courant alternatif (AC) pour être utilisée dans la plupart des applications domestiques et industrielles. C'est dans ce contexte que les onduleurs photovoltaïques jouent un rôle essentiel. [1]

Les onduleurs photovoltaïques assurent la conversion de l'énergie électrique tout en Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau sont des installations solaires qui convertissent l'énergie solaire en électricité et l'injectent directement dans le réseau électrique public. Ils permettent d'alimenter les charges locales et/ou de revendre l'excédent de production, contribuant ainsi à la transition énergétique. Ces systèmes nécessitent des onduleurs synchronisés au réseau pour assurer une compatibilité en fréquence, tension et phase garantissant des performances optimales en termes de rendement, de stabilité et de qualité de l'onde. Ils se classent en deux grandes catégories :

- Les onduleurs connectés au réseau (on-grid) : Ils injectent l'énergie produite directement dans le réseau électrique public en respectant les contraintes de synchronisation et de qualité de l'onde.
- Les onduleurs hors réseau (off-grid) : Ils fonctionnent de manière autonome, alimentant des charges isolées avec, souvent, un système de stockage (batteries).

L'objectif de cette étude est d'analyser, concevoir et comparer ces deux types d'onduleurs monophasés en mettant en avant leurs architectures, leurs principes de fonctionnement et leurs performances. Pour cela, nous nous appuyerons sur une étude théorique et des simulations afin de proposer des solutions optimisées en fonction des applications visées.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres :

Le premier chapitre présente les bases de l'énergie photovoltaïque et l'importance des onduleurs dans les systèmes solaires.

Le deuxième chapitre est consacré à l'étude, modélisation et dimensionnement de la chaîne de conversion photovoltaïque allant du panneau PV jusqu'à l'onduleur. Il s'attache également à la présentation des stratégies de commande associées à chaque convertisseur composant cette chaîne.

Le troisième chapitre est consacré à l'analyse des systèmes photovoltaïques connectés et isolés, avec une attention particulière portée aux stratégies de commande mises en œuvre ainsi qu'aux mécanismes de synchronisation avec le réseau électrique. Ce chapitre intègre également une discussion approfondie et une interprétation critique des résultats obtenus pour chaque configuration étudiée. Par ailleurs, une étude comparative est menée afin d'évaluer les performances des filtres LCL amortis et non amortis.

Chapitre I : Généralité sur l'Energie photovoltaïque et les onduleurs

I.1. Introduction à l'énergie renouvelable

Il existe de nombreux concepts liés aux énergies renouvelables, qui ont été trouvés dans de nombreuses sources, mais elle peut être définie comme une énergie produite à partir de ressources naturelles renouvelables toujours disponibles, c'est-à-dire, une énergie qui se renouvelle suffisamment vite pour que l'utilisation actuelle n'affecte pas la disponibilité. [1]

L'énergie renouvelable, ou énergie verte, est une énergie respectueuse de l'environnement, car elle repose sur l'utilisation de ressources naturelles non polluantes (Figure I.1) :

- L'énergie éolienne.
- Biomasse.
- Énergie hydraulique.
- Énergie thermique.
- L'énergie solaire.

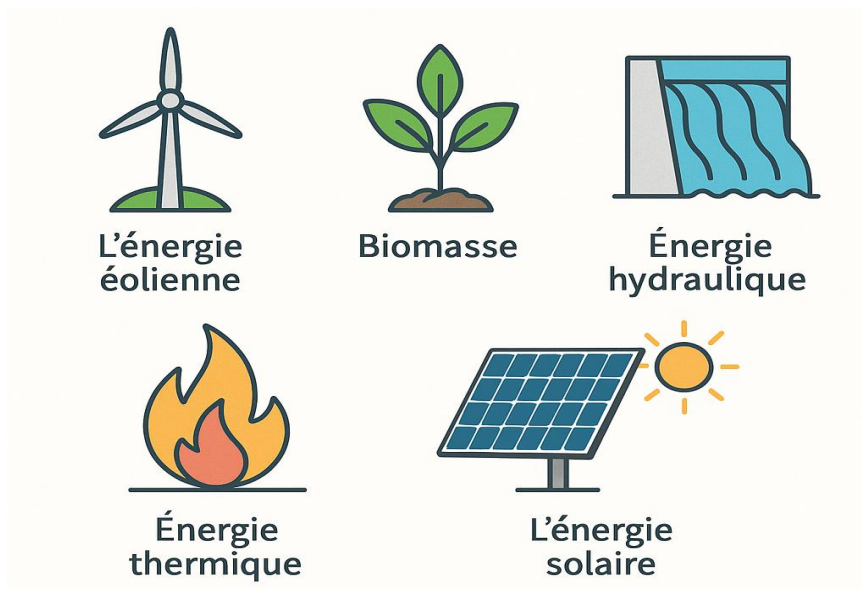


Figure I. 1 Les différents types des énergies renouvelables.

I.2. Applications du photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque, abondante et facilement disponible, peut être utilisée aussi bien dans les zones urbaines que dans les zones isolées du réseau public. Produite au plus près de son lieu de consommation, elle est directement exploitée par l'utilisateur. Elle peut être utilisée de deux manières : soit elle est raccordée au réseau électrique, soit elle alimente en électricité des sites isolés. Elle peut être combinée avec d'autres énergies renouvelables, d'où le nom de système hybride

I.3. Classification d'un système solaire photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques sont actuellement divisés en deux grandes catégories : Les systèmes autonomes et les systèmes couplés au réseau. [2]

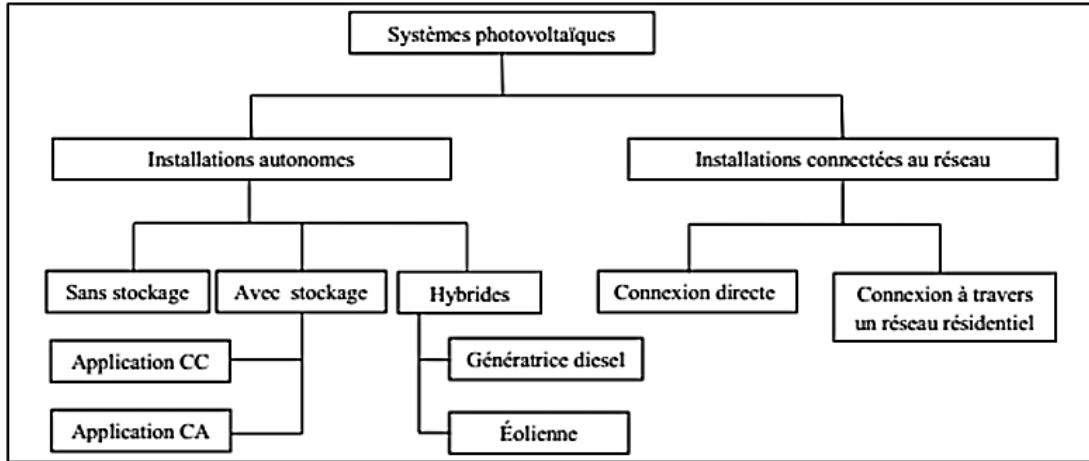


Figure I. 2 : Classification des systèmes photovoltaïques.

I.3.1. Système autonome

Un système autonome est un dispositif, ou un ensemble de dispositifs, capable de produire, de gérer et de consommer de l'énergie de manière indépendante, sans être raccordé au réseau électrique public. Il repose généralement sur des sources d'énergie renouvelable, telles que le solaire ou l'éolien, couplées à des systèmes de stockage (batteries), afin de garantir une alimentation électrique continue et fiable, même en l'absence de production instantanée. Ce type de système est particulièrement adapté aux zones isolées ou aux applications nécessitant une autonomie énergétique [3].

I.3.1.1. Les systèmes autonomes avec stockage

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes, elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque au cours de la journée figure I.4. Donc, le stockage électrochimique dans les batteries est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques [4].

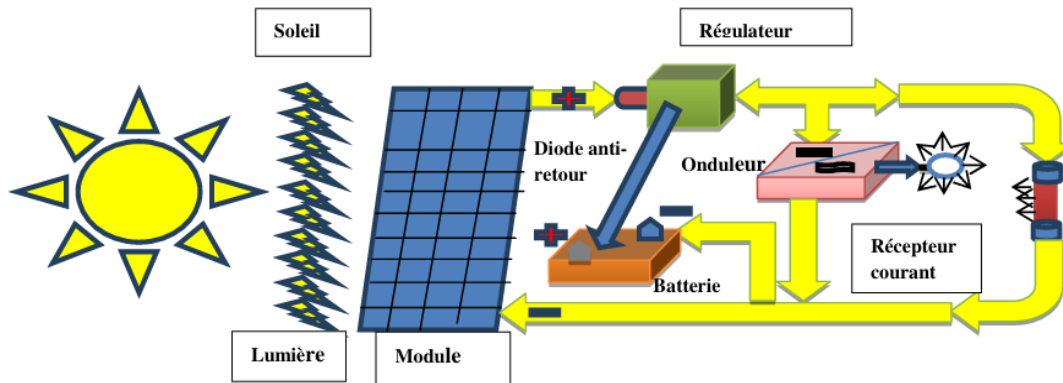


Figure I. 3 : Les systèmes autonomes avec stockage.

I.3.1.2. Les systèmes autonomes sans stockage

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairage solaire suffisant pour son démarrage. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de l'éclairage solaire. Mais il faut dimensionner le générateur photovoltaïque de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil à l'éclairage le plus faible. Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de systèmes autonomes où le stockage de l'eau dans un réservoir.

I.3.2. Systèmes photovoltaïques raccordés au réseau

Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau sont des installations solaires qui convertissent l'énergie solaire en électricité et l'injectent directement dans le réseau électrique public. Ils permettent d'alimenter les charges locales ou de revendre l'excédent de production, contribuant ainsi à la transition énergétique. Ces systèmes nécessitent des onduleurs synchronisés au réseau pour assurer une compatibilité en fréquence, tension et phase. Figure I.5 [5].

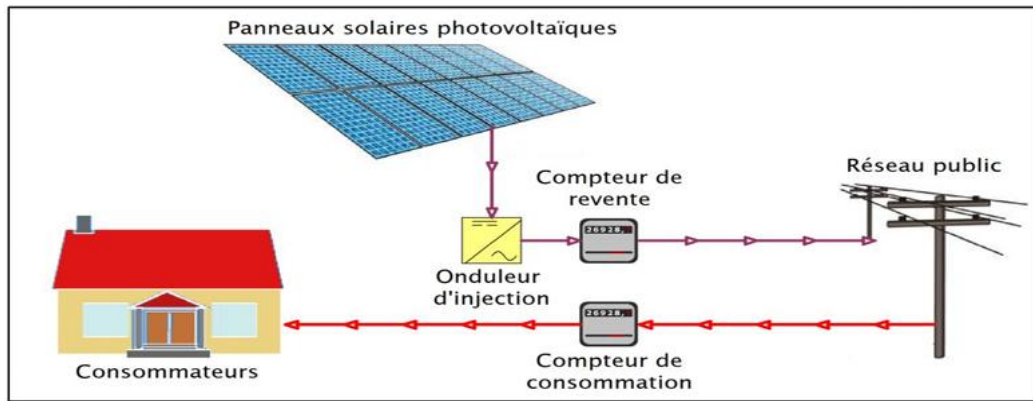


Figure I. 4 : Schéma de principe d'une installation photovoltaïque raccordée au réseau.

I.3.3. Les systèmes hybrides raccordés au réseau

Les systèmes hybrides combinent différentes sources d'énergie renouvelable (photovoltaïque, éolien, petite hydraulique, biomasse) pour garantir une meilleure qualité d'approvisionnement en électricité (Figure I.6). Ces systèmes sont toujours couplés avec des batteries. En général, les énergies éolienne et photovoltaïque sont complémentaires et permettent d'électrifier efficacement et à moindre coût les sites isolés [1].

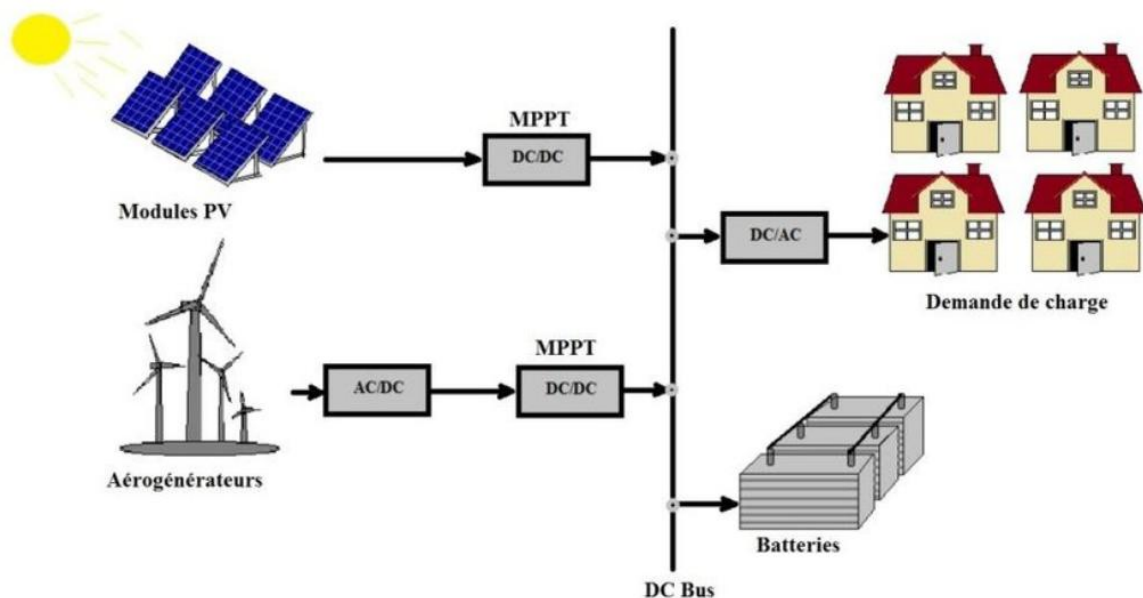


Figure I. 5 Schéma d'une installation type d'un système hybride.

I.4. Les convertisseurs statiques

Ces dernières années, les domaines de l'électronique de puissance se sont développés considérablement et, offrent un potentiel énorme pour la conversion d'énergie électrique. La recherche dans ce domaine considère plusieurs aspects, notamment les topologies des

convertisseurs, les structures et les performances des interrupteurs de puissance et ainsi que les techniques de commande [6][7].

Les convertisseurs statiques à structure tension sont des éléments essentiels de nombreux systèmes d'électronique de puissance tels que les variateurs de vitesse, les alimentations sans interruption et les filtres actifs. La sécurité de ces systèmes, leur Fiabilité, leurs performances, la qualité de l'énergie et la continuité de service constituent aujourd'hui des préoccupations majeures dans le domaine de l'énergie.

I.4.1. Définition d'un convertisseur statique

Les convertisseurs sont des dispositifs ayant pour rôle la conversion du courant et de la tension électrique d'une certaine nature en un courant d'une autre nature. Il existe plusieurs types de convertisseurs :

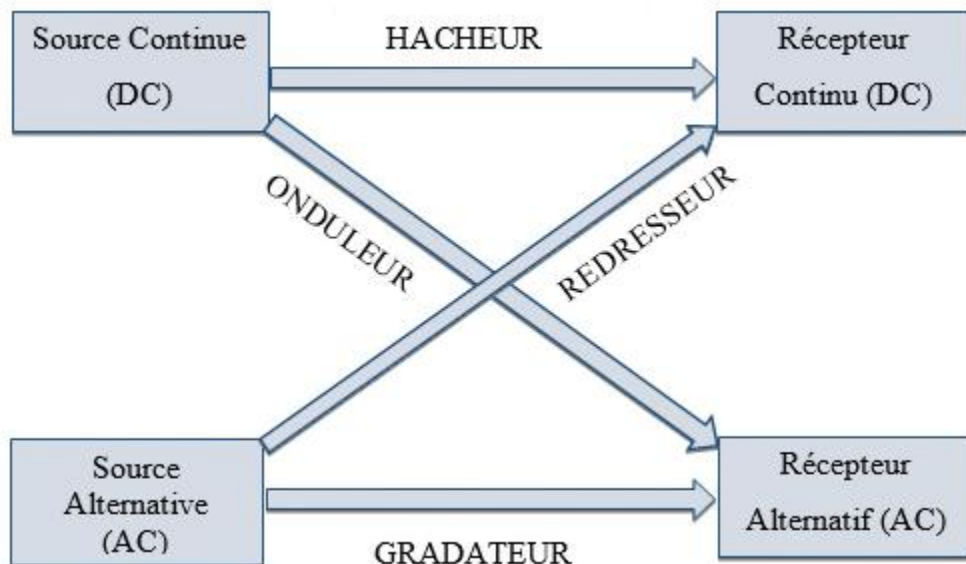


Figure I. 6 : Les différents types de Convertisseurs statiques.

Dans les systèmes photovoltaïques, les convertisseurs statiques, constitués de dispositifs à semi-conducteurs, sont pilotés afin d'adapter et de convertir l'énergie continue fournie par le générateur photovoltaïque (GPV), soit en une tension continue différente, soit en une puissance alternative adaptée aux exigences du réseau électrique [8][9].

Généralement, on trouve deux sortes de convertisseur (les hacheurs DC-DC, les onduleurs DC-AC).

I.1.4.2. Composants de puissance du convertisseur de puissance électrique

L'apparition des semi-conducteurs : les diodes, thyristors, transistors bipolaires, IGBT, MOSFET et GTO permettant le contrôle de courants et de tensions importants a été un essor considérable de cette technique dans le domaine de l'énergie. Le tableau I.1 nous présente une comparaison des composants de puissance et quelques domaines d'applications montrés par la Figure I.1

Tableau I. 1 : Comparaison des éléments de l'électronique de puissance

Eléments de puissances	Non commandé	Commandé	Avantages	Inconvénients
Diode	Oui	Non	Puissance plus élevée que celle du thyristor.	Aucune intervention externe n'est possible.
Thyristor	Non	Oui	Très fortes puissances ; Idéal pour des montages redresseurs.	Lent ; Commande uniquement à la fermeture.
Transistor bipolaire	Non	Oui	Puissance élevée ; Pertes réduites.	Commande de base complexe Lent et fragile.
IGBT	Non	Oui	Commutation assez rapide ; Energie de commande faible ; Puissance élevée ; Pertes de conduction faible ; Utiliser pour de faible tension.	Fréquence de commutation limitée ; Plus lent que le MOSFET à l'ouverture.
GTO	Non	Oui	Un petit courant de grille permet la conduction et sa désactivation ; Utilisé pour de plus grande puissance.	Commande complexe ; Lent et fragile.
MOSFET	Non	Oui	Fréquence de communication élevée ; Rapidité de commutation ; Pertes en commutation très faible.	Pertes élevées en conduction ; Puissance d'utilisation limité.
Triac	Non	Oui	Pertes de conduction faible.	Puissance d'utilisation limité.

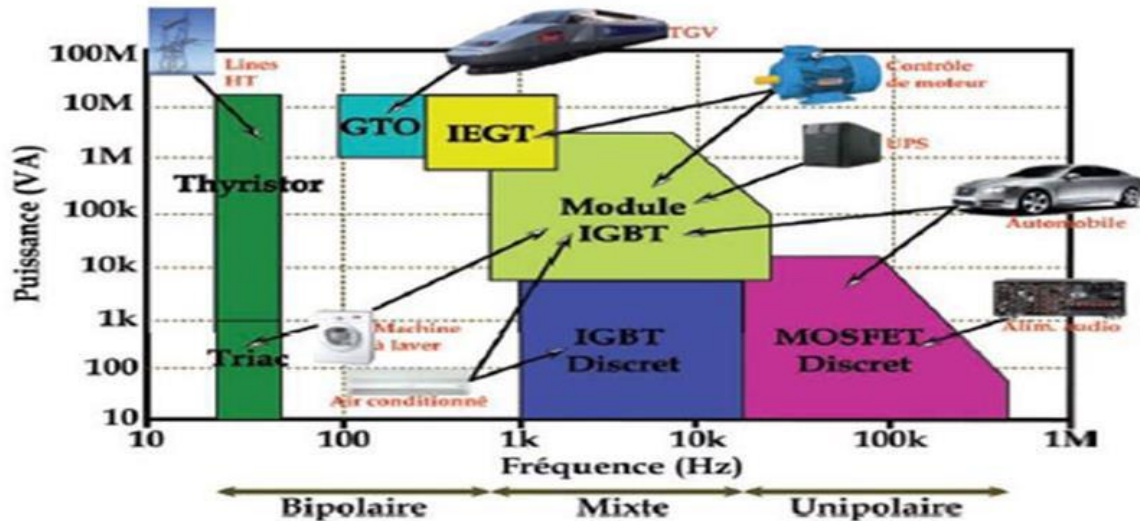


Figure I. 7 : Quelques domaines d'application des composants de puissance. [10]

I.4.3. Avantages et inconvénients des convertisseurs

❖ **Avantage :**

- ✓ Bon rendement.
- ✓ Taille et masse réduites.
- ✓ Fonctionnement silencieux. [10]

❖ **Inconvénients :**

- ✓ Harmonique, c'est seul inconvénient sérieux du pouvoir les systèmes électroniques considérable des deux côtés, du côté de la charge connectée et du côté de la source d'alimentation.
- ✓ Faible facteur de puissance.
- ✓ Capacité de surcharge faible.
- ✓ Les forts dv/dt et di/dt générés par les commutations peuvent perturber les capteurs, et il peut être intéressant de remplacer un ensemble de capteurs exposés au bruit, par un même nombre de capteurs moins perturbés. [11]

I.4.4. Les principales applications

- ✓ Cas d'urgence (hôpitaux, salle informatique). Photo volumique.
- ✓ Photo volumique.
- ✓ Gestion, transport et distribution d'EE.
- ✓ Application domestique et industrielles. [12]

I.5. Les convertisseurs DC/DC (Hacheurs)

Un hacheur peut être réalisé à l'aide d'interrupteur électronique commandable à l'ouverture et à la fermeture tels que les thyristors GTO ou les transistors bipolaires ou à effet de champ à grille isolée fonctionnant en régime de commutation. Le principe d'un hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source-charge à l'aide de l'interrupteur électronique. Celui-ci doit pouvoir être fermé ou ouvert à volonté afin d'avoir une tension de sortie continue réglable.

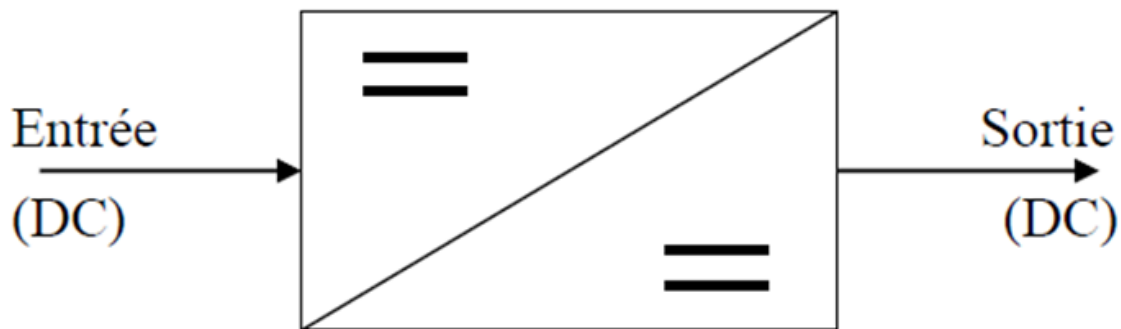


Figure I. 8 : Schéma de principe de l'hacheur.

Le mode de fonctionnement des hacheurs dépend de sa capacité de stockage d'énergie, de la période de commutation et de la charge. On distingue deux types de mode de fonctionnement.

- Mode de Conduction Continue (MCC) : le courant dans l'inductance ne s'annule pas pour une période de commutation, il est entièrement transféré, donc continu.
- Mode de Conduction Discontinue (MCD) : dans ce cas, l'énergie emmagasinée dans l'inductance L est entièrement transférée à la charge avant la fin de la période de commutation, d'où la discontinuité du courant dans l'inductance.

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour Adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en Général une tension DC constante. Les trois configurations de base sont :

- ✓ Convertisseur dévolteur (buck).
- ✓ Convertisseur survolteur (boost).
- ✓ Convertisseur dévolteur- survolteur (boost-buck).

I.5.1. Convertisseur DC/DC dévolteur (buck)

On le nomme souvent dévolteur parce qu'il réduit de façon variable la tension de sortie par rapport à celle de l'entrée ou encore l'hacheur abaisseur de tension. Il est constitué par un interrupteur d'amorçage commandé transistor (bipolaire, MOS ou IGBT ...) en série avec la source et une diode de roue libre parallèle à la source. Ces commutateurs fonctionnent de manière périodique [13].

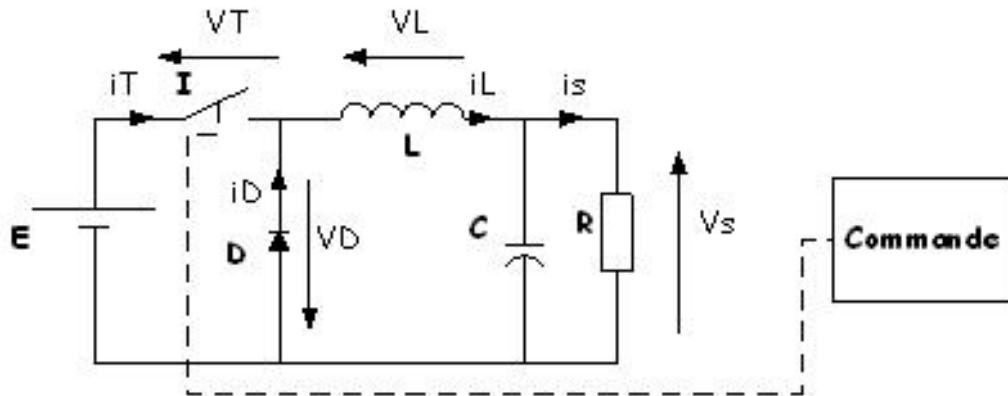


Figure I. 9 : Schéma de principe d'un hacheur série.

Ce cycle comprend deux étapes. Lors de la première l'intervalle $[0, \alpha T]$, l'interrupteur (S) est fermé, la source d'entrée V_c fournit de l'énergie à la charge et à l'inductance la diode est polarisée en inverse. Lors de la seconde l'intervalle $[\alpha T, T]$, l'interrupteur (S) est ouvert et la diode passante.

I.5.2. Convertisseur DC/DC survolteur (boost)

Cet hacheur est appelé hacheur parallèle, car le semi-conducteur à fermeture et ouverture commandées est dérivé aux bornes de l'entrée. Il est appelé également hacheur survolteur, puisque la tension de sortie est toujours plus grande que la tension moyenne d'entrée, il est également appelé élévateur (sous-entendu, de tension).

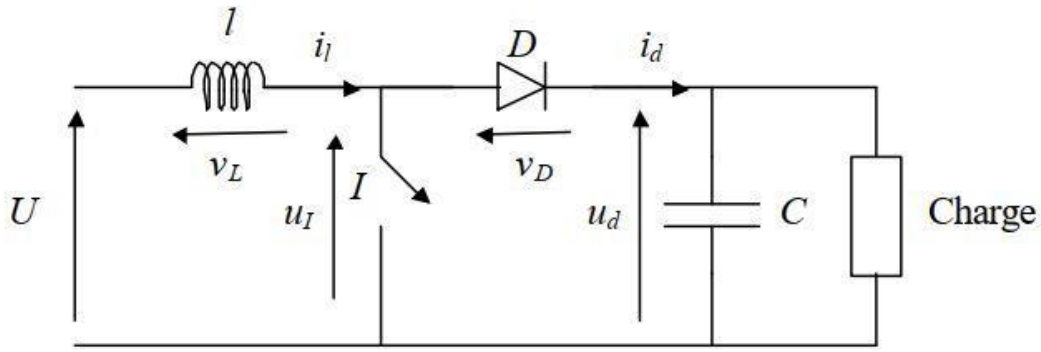


Figure I. 10 : Schéma d'un hacheur survolteur.

I.4.3. Convertisseur DC/DC dévolteur- survolteur (boost-buck)

Le circuit est alimenté par une source de tension V_e , la sortie étant une charge résistive R et rendu périodiquement conducteur avec un rapport cyclique (α) à la fréquence ($f=1/T$).

Par un tel convertisseur, on cherche à fixer une tension moyenne V_s de sortie qui réponde aux critères suivants :

- $V_0 < V_i$ Ou bien $V_0 > V_i$.
- V_L Réglable à souhait en agissant sur le rapport cyclique (α)[14].

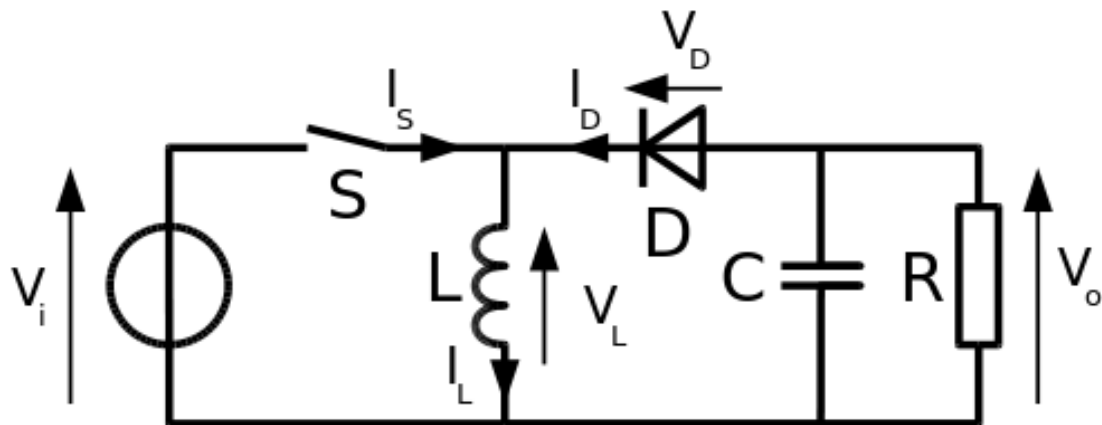


Figure I. 11 : Circuit équivalent d'un hacheur BUCK-BOOST.

Durant l'état « ton », l'énergie apportée par la source (V_i) est stockée dans l'inductance L . Cette énergie est livrée ensuite à la charge pendant l'état « toff ». En raison de la présence de la diode D , le courant circule à travers l'inductance L seulement dans une direction durant les deux états. Par conséquent, V_0 a une polarité opposée V_i . Pour cette raison, ce circuit est aussi appelé convertisseur inverseur. L'amplitude de V_L peut être inférieure ou supérieure à celle de V_i suivant la valeur de ton et de toff.

La tension de sortie est inférieure à celle de l'entrée lorsque le rapport cyclique est inférieur à un demi ($\alpha < 0.5$) et elle est supérieure à celle-ci dans le cas contraire.

Il existe d'autres hacheurs comme SEPIC et CUK dont le fonctionnement est similaire à celui de l'hacheur Buck-Boost.

I.5.4. Domaine d'utilisation des hacheurs

Un des gros domaines d'utilisation des hacheurs est la variation de vitesse du moteur à courant continu (MCC). Ils équipent par exemple la majorité des engins de moyenne traction, tels que ceux utilisés pour le métro. La première génération de TGV (TGV Sud Est) est équipée d'ensembles hacheurs-moteurs à courant continu.

On trouve aussi des hacheurs dans tous les équipements destinés à l'utilisation de l'énergie éolienne ou solaire. Ils permettent de rendre constante une tension d'entrée très versatile. Les hacheurs sont également utilisés dans l'alimentation des moteurs pas à pas.

I.6. Les convertisseur DC/AC (Onduleurs)

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC) d'amplitude et de fréquence réglable. Cette conversion est rendue possible grâce à la cellule de commutation généralement à base des IGBTs ou des MOSFETs . L'onduleur photovoltaïque joue le rôle d'interface entre le champ photovoltaïque et le réseau électrique [15].

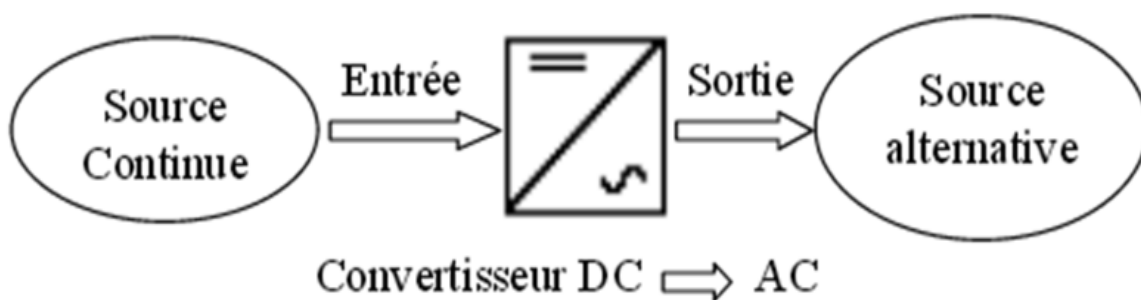


Figure I. 12 : Schéma explicatif d'un convertisseur DC/AC (Onduleur).

I.6.1. Classification des onduleurs photovoltaïque

Il existe plusieurs catégories d'onduleurs, comprenant les onduleurs autonomes, les onduleurs non autonomes (assistés), les onduleurs à résonance, les onduleurs de tension et les onduleurs de courant. Ces onduleurs peuvent être contrôlés par différents types de commandes,

tels que la commande symétrique, la commande asymétrique, la modulation de largeur d'impulsion (MLI) et la modulation de largeur d'impulsion vectorielle (MLI vectorielle).

Les montages onduleurs sont très nombreux en fonction de leurs applications, de leurs structures et de leurs commandes. Nous pouvons classer les onduleurs comme suit :

I.6.1.1. Le nombre de phases de la charge

- ❖ **L'onduleur monophasé** : C'est un onduleur qui délivre en sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement utilisée aux alimentations de secours ; L'onduleur en pont complet représenté dans la Figure I.14 comporte quatre interrupteurs de puissance réversible en courant désignés par Q1, Q2, Q3 et Q4 (quatre diodes montées en antiparallèle sur quatre interrupteurs électroniques unidirectionnels) et une source continue de tension E.

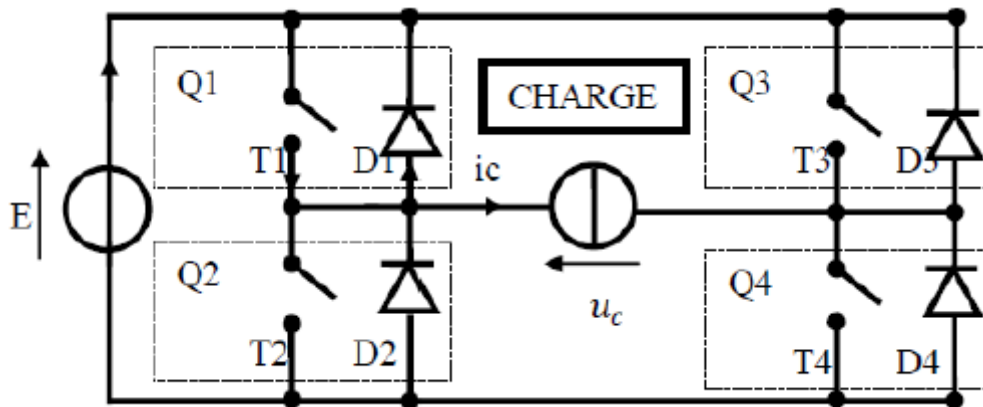


Figure I. 13 : Onduleur monophasé.

- ❖ **L'onduleur triphasé** : L'onduleur est composé de six transistors avec une diode antiparallèle pour chacun. Les transistors T1 et T1' comme T2 et T2' et T3 et T3' sont complémentaires en théorie c'est-à-dire que lorsque l'un des deux est ouvert l'autre est fermé et inversement. Dans la théorie seulement car les commutations réelles des interrupteurs de puissance ne sont pas instantanées. La configuration la plus dangereuse est celle où les deux transistors sont fermés, car la tension de bus (de l'ordre de plusieurs centaines de volts) est mise en court-circuit. Un courant très important se déverse alors dans les transistors entraînant leur destruction. C'est donc cette configuration que l'on va éviter. On ouvrira donc l'un des transistors avant de fermer l'autre. Le temps de sécurité entre l'ouverture de l'un et la fermeture de l'autre est appelé « temps mort ». Il doit être parfaitement calibré pour un fonctionnement optimal de l'onduleur. Le moteur étant un circuit inductif qui n'apprécie pas les discontinuités de courants, c'est pour cela

que chaque transistor possède une diode en anti parallèle. Pour laisser passer le courant pendant les phases où les deux transistors sont ouverts.

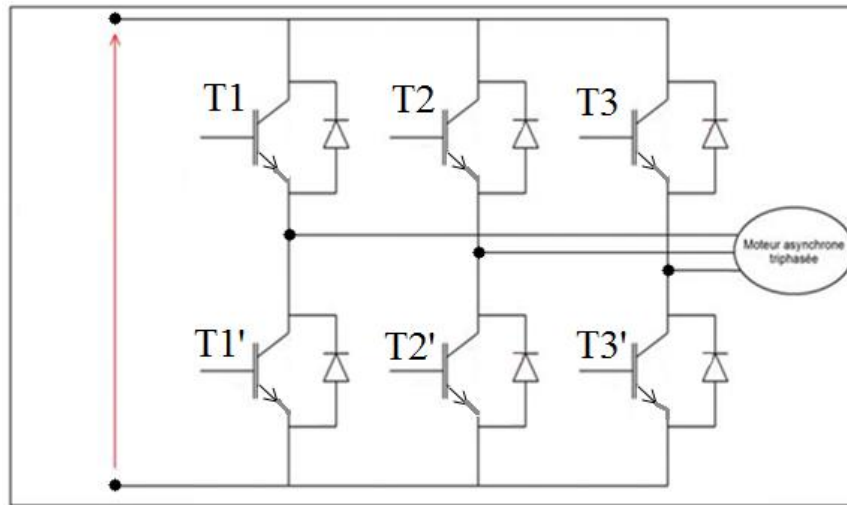


Figure I. 14 : Structure d'un onduleur triphasé.

I.6.1.2. La nature de la source

- **L'onduleur de tension** : alimenté par un générateur de tension continue, il impose par sa Commande la tension $u(t)$; la charge impose alors l'intensité $i(t)$.

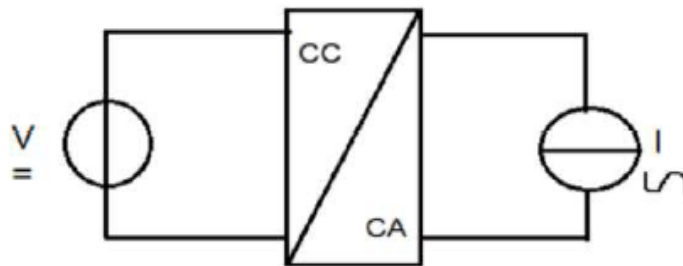


Figure I. 15 : Onduleur de tension.

- **L'onduleur de courant** : alimenté par un générateur de courant continu, il impose par sa commande le courant $i(t)$ la charge impose la tension $u(t)$.

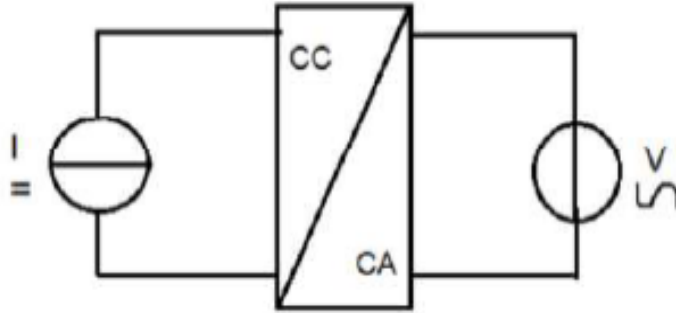


Figure I. 16 : Onduleur de courant.

I.6.1.3 La structure du convertisseur DC-AC

On trouve des structures en demi-point, en pont, avec transformateur.

A. La nature des interrupteurs

- Interrupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture (Transistor bipolaire, MOSFET, IGBT, GTO).
- Interrupteurs commandés à la fermeture (Thyristors) avec blocage naturel ou forcé.
- Interrupteurs commandés à l'ouverture (Thyristor dual).

B. Le mode de commande

- Commande décalée.
- Commande pleine onde.
- Commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI).

I.6.2 Les applications des onduleurs

Parmi les nombreux domaines d'emploi des onduleurs, on trouve principalement les onduleurs à fréquence fixe à commutation forcée : alimentés le plus souvent par une Batterie d'accumulateurs. Ils jouent d'ordinaire le rôle d'alimentation de sécurité, ils constituent à ce titre, les onduleurs à fréquence variable à commutation forcée : alimentés à Partir du réseau industriel par l'intermédiaire d'un montage redresseur, ils délivrent une Tension de fréquence et de valeurs efficaces nécessaires pour faire tourner à vitesse variable. Un moteur à courant alternatif [5]. L'onduleur de secours pour le matériel informatique permet d'assurer la continuité de l'alimentation en cas de coupures sur le réseau, il permet aussi de filtrer les éventuels défauts de la tension du réseau (parasites ou surtensions) [6].

I.7 Problématiques liées à l'intégration des énergies renouvelables

L'intégration à grande échelle des énergies renouvelables (ENR) telles que l'éolien et le photovoltaïque au réseau électrique présente des défis importants. Contrairement aux centrales conventionnelles, les unités de production renouvelable sont souvent décentralisées, connectées via des convertisseurs électroniques et soumises à une variabilité importante, ce qui affecte la stabilité, la qualité et la fiabilité du réseau.

I.7.1 Variabilité et incertitude de la production

Les énergies renouvelables sont par nature intermittentes et non prévisibles à court terme. Cela pose des problèmes de stabilité du réseau, de prévision de la charge et de gestion de la réserve de puissance. La forte pénétration des ENR entraîne une réduction significative de l'inertie du système, rendant la fréquence plus sensible aux perturbations [6].

I.7.2 Faible capacité de maintien en cas de défaut (Fault Ride Through)

En cas de perturbation (court-circuit, chute de tension), les installations renouvelables doivent rester connectées pour soutenir le réseau. Toutefois, leur capacité à "encaisser" les défauts est limitée, surtout pour les systèmes photovoltaïques. Le développement de stratégies de contrôle robustes et de dispositifs tels que les limiteurs de courant de défaut (FCL) est donc nécessaire.

I.7.3 Qualité de l'énergie injectée

Les convertisseurs statiques des ENR injectent des harmoniques, provoquant des dégradations de la qualité de l'énergie, des pertes supplémentaires, voire des interférences dans les systèmes de communication. Des filtres actifs et passifs sont nécessaires pour garantir la conformité avec les normes de qualité de l'énergie.

I.8 Applications des ENR connectées au réseau

Les ENR apportent divers bénéfices fonctionnels au réseau lorsqu'elles sont bien intégrées

- Production décentralisée : réduction des pertes par acheminement.
- Soutien à la tension : injection/réception de puissance réactive.
- Services auxiliaires : participation à la régulation de fréquence, black-start, etc.
- Optimisation de la consommation locale : via les micro-réseaux et les systèmes de gestion de la demande.

Les technologies de supervision comme SCADA et EMS permettent de piloter ces applications efficacement. [7]

I.9 Règles de connexion des ENR au réseau

Les gestionnaires de réseau ont élaboré des codes de réseau imposant des exigences techniques pour connecter les générateurs renouvelables :

- Plage de fonctionnement admissible en tension et en fréquence
- Capacité FRT (Fault Ride Through)
- Réponse dynamique à la variation de fréquence
- Systèmes anti-îlotage
- Compatibilité électromagnétique [8]

Ces règles visent à garantir la stabilité, la sécurité et la fiabilité du système électrique.

I.10 Normes et standards internationaux

L'interopérabilité entre équipements hétérogènes et la conformité aux exigences réglementaires passent par l'adoption de standards internationaux :

I.10.1 Normes techniques

- IEEE 1547 : exigences pour l'interconnexion des ressources d'énergie distribuées aux réseaux.
- IEC 61400-21 : normes de qualité d'énergie pour les systèmes éoliens.
- IEC 61850 : protocoles de communication dans les sous-stations.
- IEC 61000 : normes CEM pour les équipements connectés au réseau. [9]

I.11 Classification des onduleurs photovoltaïques connectés au réseau

Étant donné que l'onduleur convertit le courant continu du module PV en courant alternatif pour l'injecter dans le réseau, il est responsable de la qualité de l'énergie qui doit être conforme aux exigences des différentes normes, qui sont brièvement décrites dans la section suivante. En fonction de l'isolation galvanique entre le module PV et le réseau, l'onduleur PV lié au réseau peut être classé comme isolé ou non isolé. L'isolation galvanique entre le module PV et le réseau peut être observée en utilisant un transformateur de fréquence de ligne ou un transformateur haute fréquence qui ajuste la tension continue du convertisseur.

Les classifications générales des onduleurs photovoltaïques connectés au réseau sont les suivantes :

- Onduleur central.
- String Onduleur.
- Onduleur intégré au module.
- Onduleurs multi-branches.

I.10.1. Onduleur centrale

Le système d'onduleurs centraux représenté sur la figure sont généralement connectés à une application triphasée ; aucun découplage n'était donc nécessaire. La tension générée par les modules connectés en série était suffisamment élevée pour satisfaire la condition de tension d'entrée de l'onduleur [12]. Cependant, cet onduleur présentait des inconvénients importants tels que des pertes de puissance élevées en raison du suivi centralisé du point de puissance maximale (MPPT), des câbles DC à haute tension entre les panneaux PV et les onduleurs en raison de la tension d'entrée élevée, une conception non flexible, des pertes dans les diodes de la chaîne.

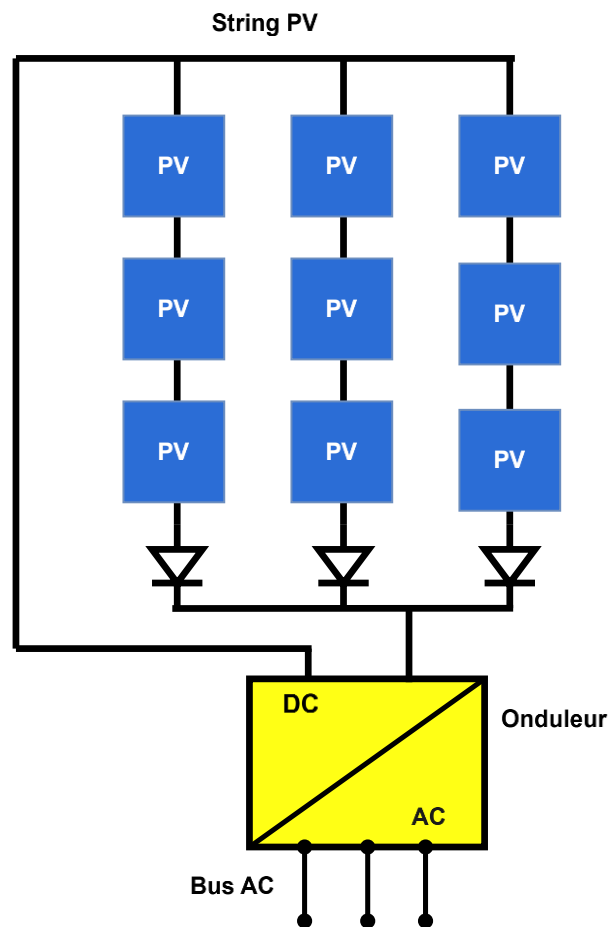


Figure I. 17 : Onduleurs centraux.[12]

I.11.2. Onduleur de chaîne (*String Inverter*)

Un onduleur de chaîne est une configuration largement utilisée dans les systèmes photovoltaïques (PV), où plusieurs modules PV sont connectés en série (formant une "chaîne") puis reliés à un onduleur centrale commun, comme illustré en figure I.18. Cette topologie reste une solution dominante pour les installations résidentielles et de moyenne envergure en raison de son équilibre entre coût, efficacité et fiabilité. Cependant, ses performances peuvent se dégrader en cas d'ombrage partiel, ce qui a conduit à l'adoption d'autres solutions dans les installations sujettes à des déséquilibres de production [12].

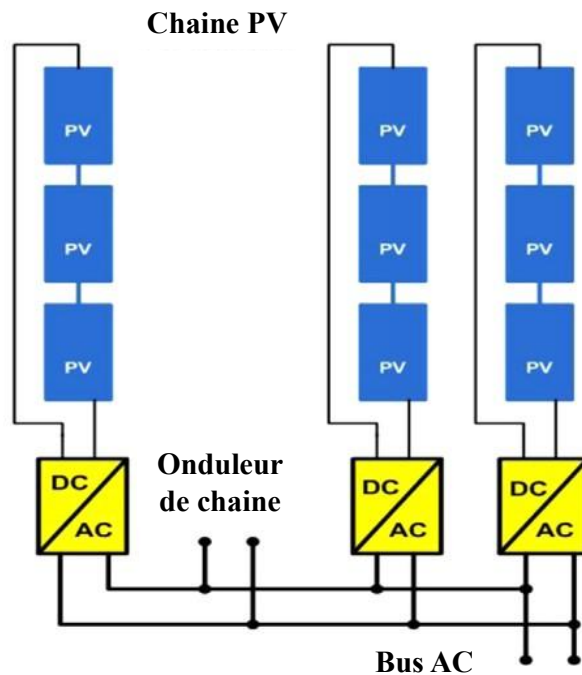


Figure I. 18 : Topologie d'un onduleur de chaînes. [12]

I.11.3. Onduleur intégré au module (micro-onduleur)

Un onduleur intégré au module est un système de conversion d'énergie décentralisé où chaque module photovoltaïque dispose de son propre onduleur dédié. Cette topologie s'oppose aux onduleurs de chaîne ou centraux en répartissant le processus d'inversion au niveau de chaque module. Cette configuration est idéale pour les installations résidentielles et les petits systèmes commerciaux où les problèmes d'ombrage, de déséquilibre entre modules ou de flexibilité de conception sont critiques. Bien que son coût initial soit plus élevé, les gains en production d'énergie justifient souvent l'investissement dans des conditions sous-optimales [12].

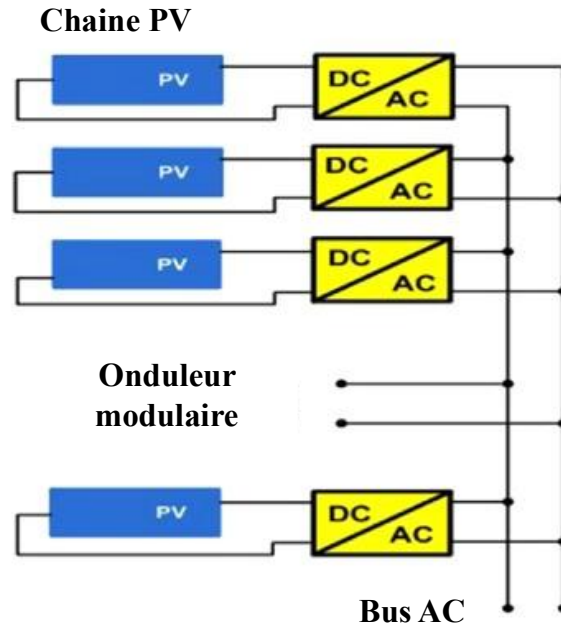


Figure I. 19 : Onduleur intégré au module. [12]

I.11.4. Onduleur à multi-chaînes

Un onduleur à multi-chaînes (*Multi-String*) constitue une architecture hybride innovante, située à mi-chemin entre les onduleurs string traditionnels et les onduleurs centraux de grande puissance. Cette solution optimisée permet de concilier les avantages économiques des configurations décentralisées avec la robustesse et la supervision simplifiée des systèmes centralisés. Sur le plan technique, elle se distingue par sa capacité à gérer indépendamment plusieurs chaînes photovoltaïques en parallèle, chacune fonctionnant à son point de puissance maximale (MPP) propre. Cette caractéristique est particulièrement pertinente dans les environnements commerciaux ou industriels, où les variations d'ensoleillement (liées à l'orientation des toitures, aux ombrages partiels ou à la dégradation différentielle des modules) peuvent induire des déséquilibres de production entre strings [12].

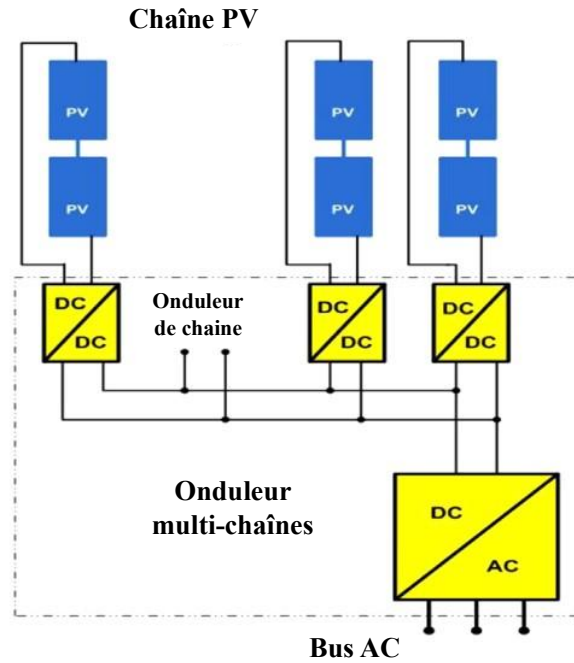


Figure I. 20 : Onduleurs multi-chaines. [12]

I.12 Conclusion

Ce chapitre a présenté les notions essentielles sur les énergies renouvelables, en mettant l'accent sur l'énergie photovoltaïque et ses différentes applications. Nous avons distingué les types de systèmes PV (autonomes, connectés au réseau, hybrides) et décrit leurs architectures.

Une attention particulière a été portée aux convertisseurs statiques, notamment les hacheurs et les onduleurs, indispensables à la conversion et à l'adaptation de l'énergie produite. Enfin, les principales catégories d'onduleurs photovoltaïques ont été abordées, en soulignant leur rôle dans l'intégration au réseau. Le second chapitre sera consacré aux dimensionnement et modélisation d'une chaîne de conversion photovoltaïque.

Chapitre II : Dimensionnement et Modélisation de la Chaine de Conversion Photovoltaïque

II.1 Introduction

Le dimensionnement et la modélisation des systèmes photovoltaïques (PV) sont des étapes cruciales pour garantir une conversion efficace de l'énergie solaire en électricité utilisable.

Ce chapitre explore les différentes composantes d'une chaîne de conversion PV, en commençant par la modélisation des panneaux solaires et des convertisseurs DC/DC, jusqu'à la conception des onduleurs et des filtres associés. Les modèles mathématiques, les simulations et les techniques de commande, notamment le suivi du point de puissance maximale (MPPT) et la modulation MLI, ont fait l'objet d'une analyse détaillée.

L'objectif est de fournir une compréhension approfondie des principes de base et des défis techniques liés à la conception et à l'optimisation des installations photovoltaïques, tout en mettant en lumière les solutions innovantes pour améliorer leur efficacité et leur fiabilité.

II.2 Partie I : Système photovoltaïque

II.2.1 Modèle de la cellule photovoltaïque

Le modèle à une diode constitue une représentation simplifiée mais largement utilisée pour décrire le comportement électrique des cellules photovoltaïques. Dans ce modèle, la cellule est représentée par une source de courant photo-généré I_{ph} , une diode idéale, une résistance série R_s et une résistance parallèle R_{sh} . La résistance parallèle permet de modéliser les pertes par courants de fuite internes au matériau semi-conducteur de la cellule [9].

- Une source de courant I_{ph} (le courant généré par la lumière)
- Une diode (effet semi-conducteur)
- Une résistance série R_s (pertes ohmiques)
- Une résistance parallèle R_{sh} (fuites dans la jonction).

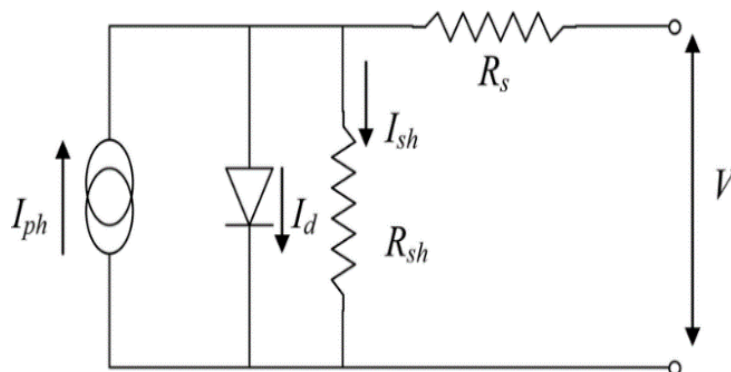


Figure II. 1 : Schéma équivalent d'une cellule PV modèle à une diode.

➤ **Équation du courant du modèle R_p :**

$$I = I_{ph} - I \left(e^{\frac{V+IR_s}{nV_t}} - 1 \right) - \frac{V+IR_s}{R_p} \quad (\text{II.1})$$

- I : courant de sortie du panneau.
- V : tension de sortie.
- I : courant de saturation inverse de la diode.
- R_s : résistance série.
- R_p : résistance parallèle.
- n : facteur d'idéalité de la diode (1 à 2 typiquement).
- V_t : tension thermique ($V_t = \frac{VT}{q}$, environ 25.9 mV à 25°C).

➤ **Courant photo-générer I_{ph}**

Le courant photo-généré dépend principalement de l'irradiance et la température. L'équation est :

$$I_{ph} = [I_{sc} + \alpha I_{sc} * (T - T_{ref})] * \frac{G}{G_{ref}} \quad (\text{II.2})$$

- I_{sc} : courant de court-circuit à la température de référence (ex: 25°C)
- αI_{sc} : coefficient de température du courant de court-circuit (A/°C)
- T : température de la cellule (en °C ou K, cohérente avec le reste)
- T_{ref} : température de référence (généralement 25°C)
- G : irradiance en fonctionnement (W/m²)
- G_{ref} : irradiance de référence (généralement 1000 W/m²).

➤ **Courant de saturation inverse I_0**

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\exp\left(\frac{V_{oc}}{I_{sc} * n}\right) - 1} \quad (\text{II.3})$$

- I_{sc} : courant de court-circuit (A).
- V_{oc} : tension à vide à la température de référence (V).
- n : facteur d'idéalité de la diode (typiquement entre 1 et 2).
- V_T : tension thermique.

➤ **Tension thermique**

$$V_T = \frac{KT}{q} \quad (\text{II.4})$$

Tableau II. 1 caractéristiques de module Soltech 1StH-215-P

Paramètre	Valeurs
Puissance maximale	213 .15 W
Tension en circuit ouvert (Voc)	36.3 V
Courant de court -circuit (Isc)	7.84 A
Tension au point de puissance max (Vmp)	29 V
Courant au point de puissance max (Imp)	7.35 A
Nombre de cellules par module	60
Coefficient de température du Voc	-0.36099 %
Coefficient de température du Isc	0.102%

➤ **Dimensionnement de PV :**

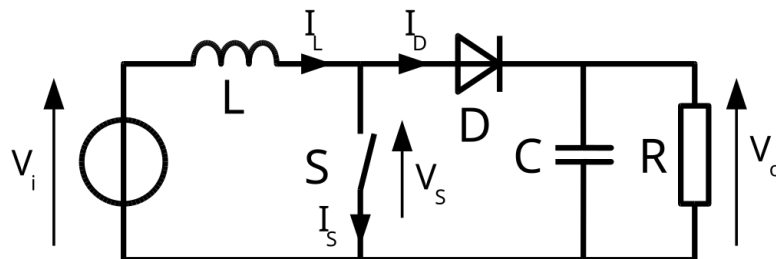
$$\text{Nombre panneau série } N_s = \frac{V_{in}}{V_{mp}} \quad N_s = \frac{500}{37} \quad N_s = 14 \text{ panneaux} \quad (\text{II.5})$$

$$\text{Nombre panneau parallèle } N_p = \frac{P_{total}}{N_s * P_{mpp}} = \frac{1.6 * 10^3 * 1.15}{14 * 213.15} = 1 \text{ panneau} \quad (\text{II.6})$$

II.2.2 Modèle du convertisseur DC/DC survolteur (boost)

II.2.2.1 Principe de fonctionnement

- Durant la phase qui s'étend de 0 à αT , l'interrupteur commandé est fermé, ce qui maintient la tension à ses bornes à zéro. Pendant cette période, la source et la charge ne sont pas connectées. La diode est bloquée, tandis que le courant dans l'inductance augmente de manière linéaire.
- Pour la seconde phase, de αT à T , l'interrupteur commandé est ouvert, permettant à l'énergie stockée dans l'inductance de diriger le courant à travers la diode, qui devient conductrice [19].

**Figure II. 2** : schéma électrique d'un convertisseur Boost.

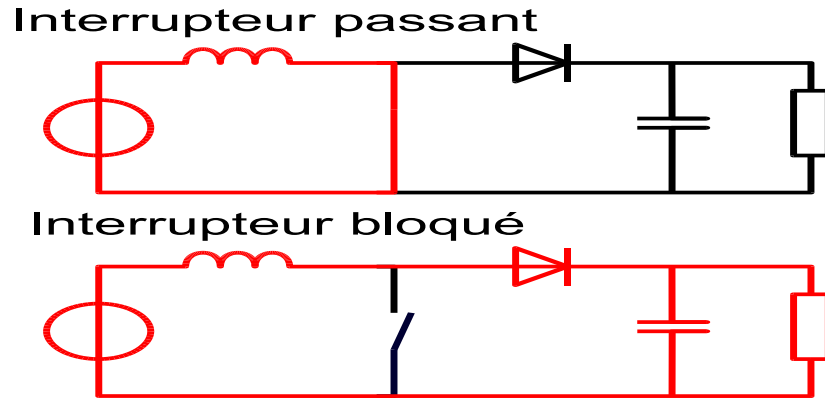


Figure II. 3 : les états de fonctionnement du Boost suivant l'état de l'interrupteur S.

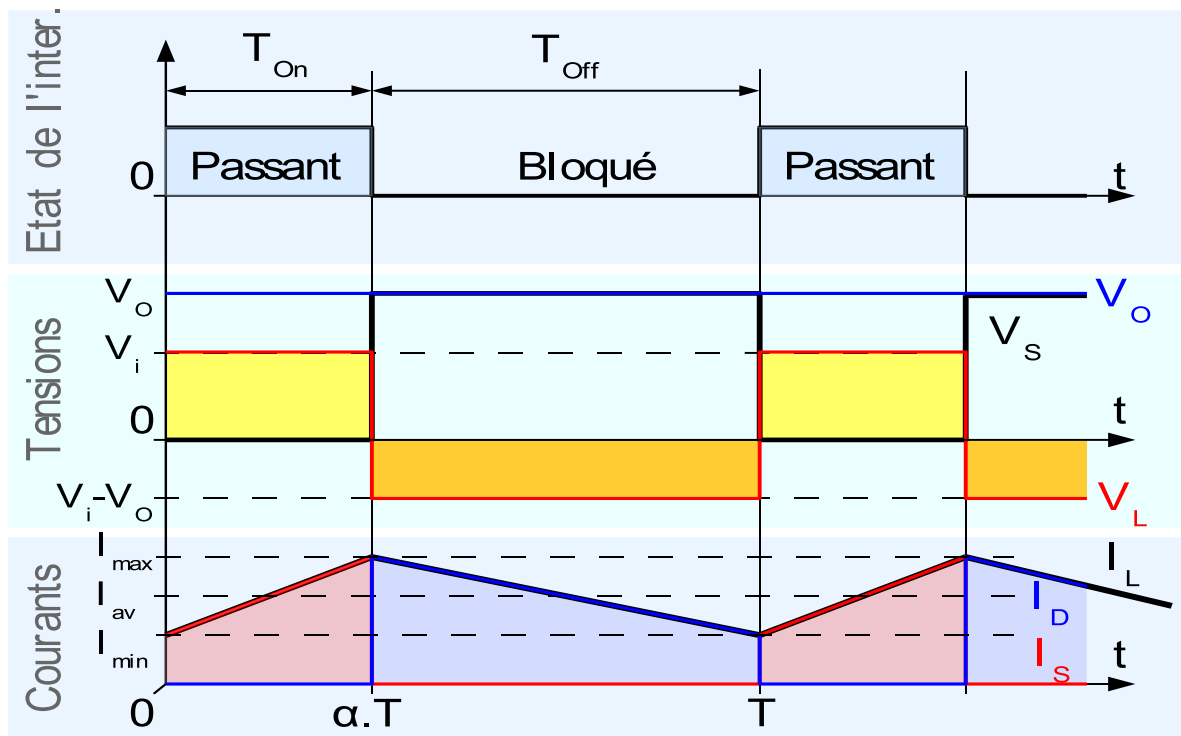


Figure II. 4 : Formes d'ondes courant/tension dans un convertisseur Boost.

II.2.2.2 Le modèle moyen du Boost

Le modèle moyen est obtenu en moyennant les équations sur une période de commutation, les équations de l'état moyen et de la sortie du convertisseur sont les suivantes :

$$L \frac{di_L}{dt} = V_e - (1 - \alpha)V_s \quad (\text{II.7})$$

$$C \frac{dV_s}{dt} = (1 - \alpha)i_L - \frac{V_s}{R} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

- α : rapport cyclique (duty cycle).
- V_e : tension d'entrée.
- V_s : tension de sortie moyenne.
- i_L : courant dans l'inductance.
- R : charge résistive.

On pose $x_1 = i_L$ et $x_2 = V_s$:

Le modèle d'état est sous forme :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{L}(V_e - (1 - \alpha)x_2) \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{C}(1 - \alpha)x_1 - \frac{x_2}{RC} \end{cases} \quad (\text{II.9})$$

En forme matricielle :

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (\text{II.10})$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1 - \alpha}{L} \\ \frac{1 - \alpha}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{bmatrix}$$

II.2.2.3 Sélection des composants du Boost

- Rapport cyclique : $D = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} = 0.274$
- L'inductance L : $L = \frac{V_{in} * D}{D * I_L * f_s} \quad L = 616.30 \mu H$
- Capacité de sortie C : $C = \frac{I_{out} * d}{f_s * D * V_{out}} \quad C = 5617.39 \mu F$

II.2.3 Simulation de la partie I

II.2.3.1 Description du système

Le système présente dans model Simulink est une chaîne de conversion de puissance PV conçue pour extraire efficacement la puissance maximale de panneau solaire et la délivrer sous forme de tension DC plus élevée et réguler à un étage suivant ou à une charge, grâce à l'interaction cruciale entre contrôle MPPT et le convertisseur boost.

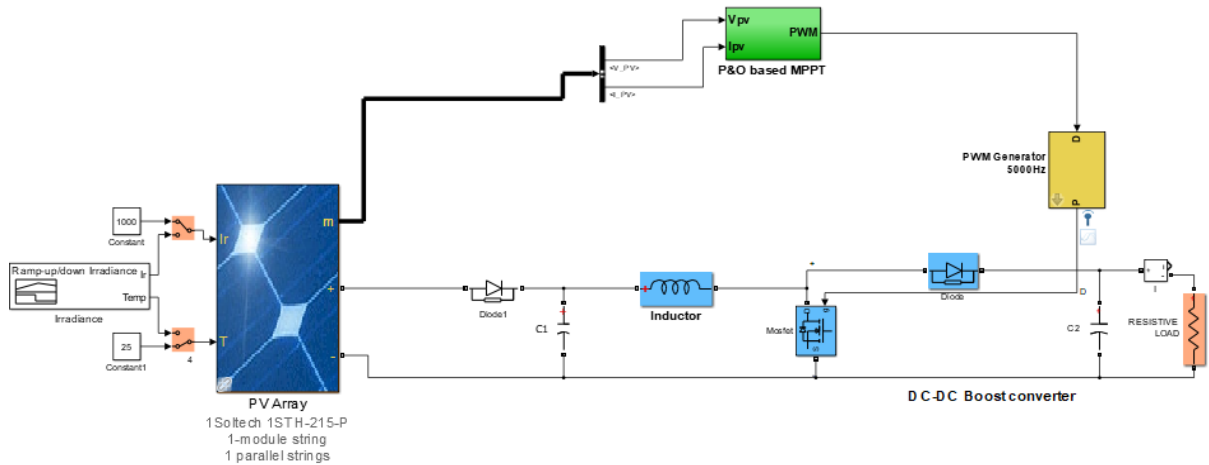


Figure II. 5 : Chaîne de conversion PV.

II.2.3.2 Classification de MPPT

Les cellules et modules photovoltaïques (PV) génèrent des puissances variables en fonction des conditions environnementales telles que l'ombrage ou encore l'angle d'incidence du rayonnement solaire. De ce fait, la production de puissance maximale n'est pas garantie pour toutes les conditions de charge électrique [10]. Pour pallier ce problème, des techniques de recherche du point de puissance maximale (MPPT, *Maximum Power Point Tracking*) sont mises en œuvre avec des algorithmes de commande appropriés afin d'extraire la puissance maximale disponible des systèmes PV. Il existe plusieurs techniques de MPPT conçues pour faire fonctionner les modules PV à leur point de puissance maximale. Toutefois, l'efficacité de ces méthodes dépend fortement de leur capacité à suivre ce point en conditions météorologiques changeantes [20]. Ces techniques peuvent être classées en trois différentes catégories, comme illustré sur la figure ci-dessous :

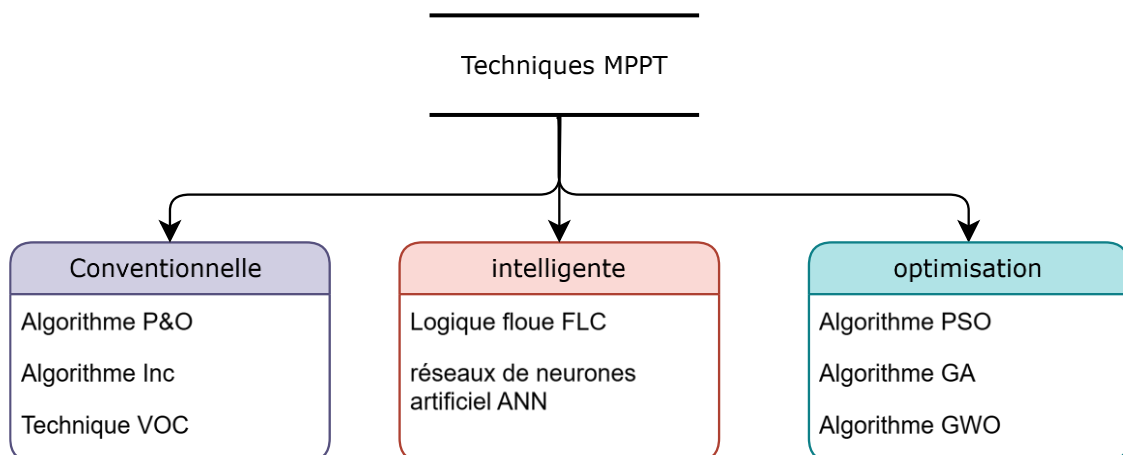


Figure II. 6 : schéma de technique de MPPT.

La méthode P&O est largement utilisée dans les produits commerciaux et constitue la base de la plupart des algorithmes les plus sophistiqués présentés dans la littérature [11]. Elle est largement utilisée dans la pratique en raison de son faible coût, de sa simplicité et de sa facilité de mise en œuvre. L'algorithme P&O fonctionne périodiquement en perturbant le point de tension de fonctionnement (V) et en observant la variation de puissance afin de déduire la direction du changement à donner à la référence de tension V_{ref} .

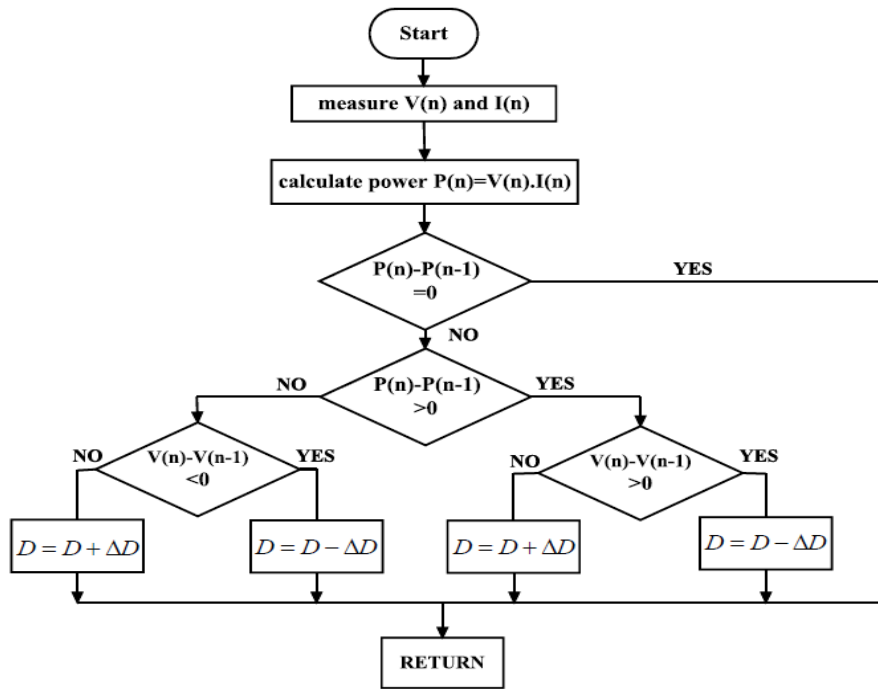


Figure II. 7 : Organigramme de l'algorithme de la technique PO [16].

II.2.3.3 Résultats et discussions

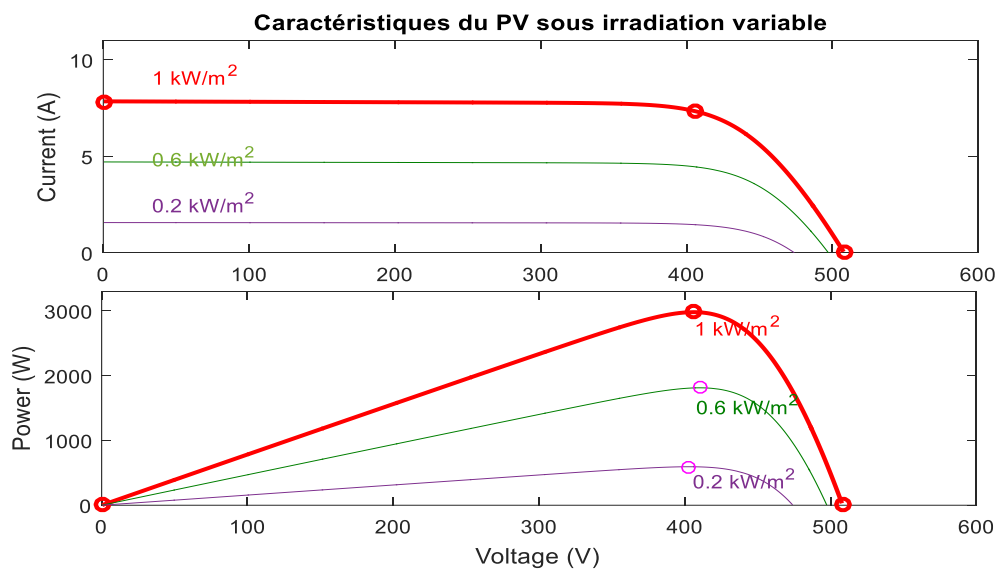


Figure II. 8 : Caractéristique du PV sous irradiances variable et température fixe.

- Cette figure montre que l'intensité délivrée par le panneau augmente proportionnellement avec l'irradiation, tandis que la tension en circuit ouvert reste quasi constante. Cela confirme que le courant du panneau dépend fortement de l'éclairement solaire.

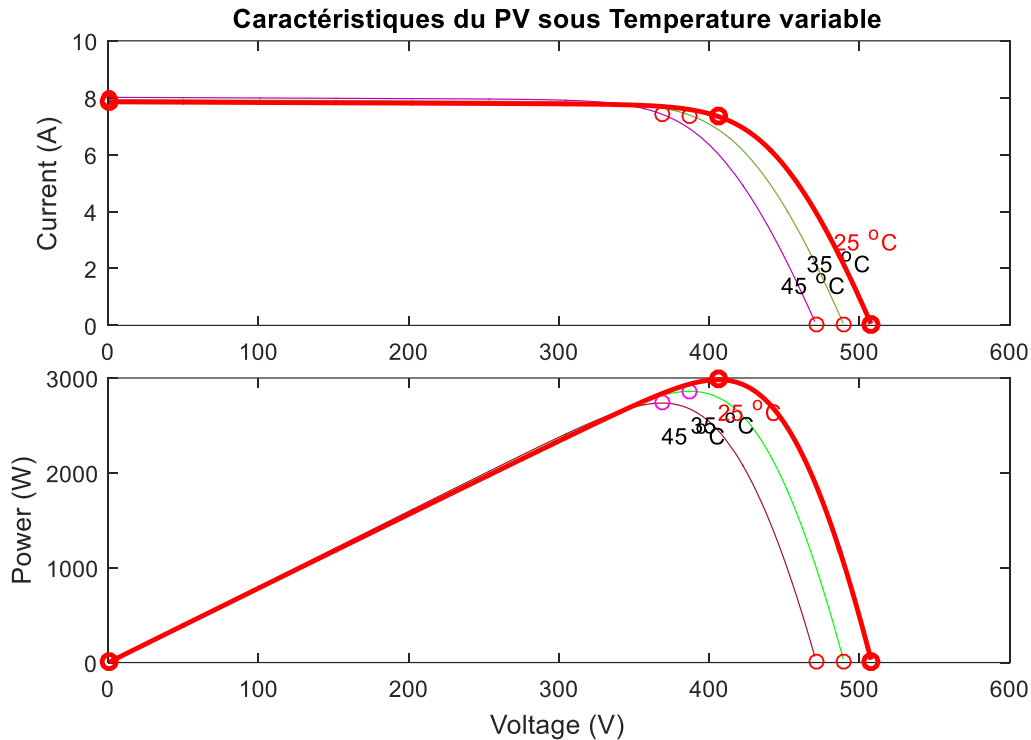


Figure II. 9 : Caractéristique du PV sous température variable et irradiances fixe.

- Ici, on observe que l'augmentation de la température diminue la tension de sortie du panneau, ce qui entraîne une légère baisse de la puissance maximale. Cela illustre un phénomène bien connu : la sensibilité thermique négative des cellules photovoltaïques, ce qui justifie l'importance du refroidissement ou de l'optimisation thermique dans les installations réelles.

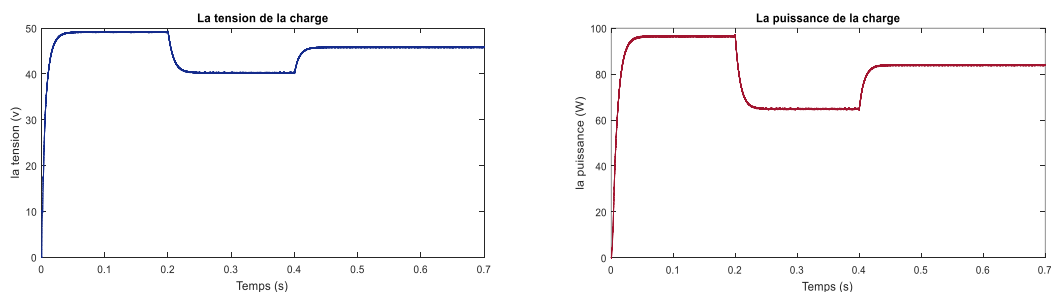


Figure II. 10 : l'allure de puissance et tension de la charge.

- La figure montre que la tension et la puissance délivrées à la charge sont stables, ce qui témoigne d'un bon dimensionnement du système. Le fonctionnement autour du point

de puissance maximale (MPP) est bien respecté, garantissant une utilisation efficace de l'énergie photovoltaïque.

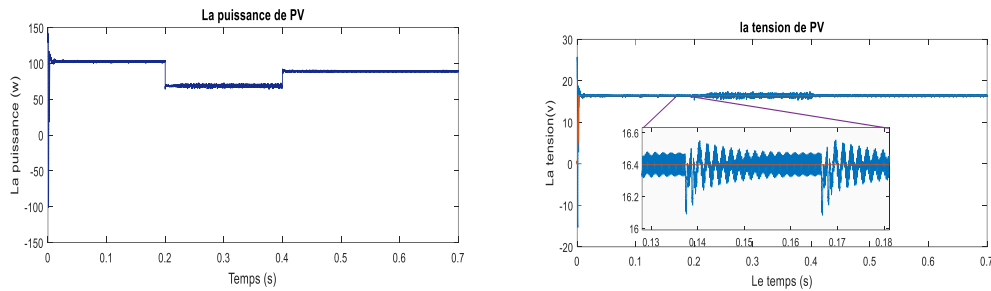


Figure II. 11 : l'allure de puissance et tension de PV.

- La courbe traduit une exploitation correcte du générateur photovoltaïque. La variation de la tension entraîne une variation correspondante de la puissance, ce qui confirme que le convertisseur opère autour du MPP pour extraire un maximum d'énergie.

II.3 Partie II : onduleur

II.3.1 Modèle de l'onduleur et le filtre

L'onduleur monophasé permet de convertir une tension continue, issue par exemple d'un champ photovoltaïque, en une tension alternative. Pour assurer une qualité de signal conforme aux normes (THD faible), un filtre de type LC est souvent utilisé à la sortie de l'onduleur. Dans cette section, nous développons une modélisation mathématique de l'ensemble onduleur et filtre LC [21].

En notant :

- $V_{inv}(t)$: tension de sortie de l'onduleur (signal PWM)
- $I_L(t)$: courant dans l'inductance
- $V_{out}(t)$: tension aux bornes de la charge
- L : inductance
- C : capacité

➤ Sélection de l'inductance

En appliquant la loi de maille :

$$L_f \frac{di_L}{dt} = v_{ond}(t) - v_{ch}(t) \quad (\text{II. 11})$$

➤ Sélection du condensateur

En appliquant la loi des nœuds :

$$C_f \frac{dV_{ch}(t)}{dt} = i_L(t) - \frac{V_{ch}(t)}{R} \quad (II.12)$$

➤ **Modèle d'état de l'onduleur avec Filtre LC**

$$x_1 = i_L(t); \quad x_2 = V_{ch}(t)$$

Le système peut être exprimé sous forme d'état suivant :

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = \frac{1}{L_f} (v_{ond} - x_2) \\ \frac{dx_2}{dt} = \frac{1}{C_f} (x_1 - \frac{x_2}{R}) \end{cases} \quad (II.13)$$

Soit sous forme matricielle :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & -\frac{1}{RC_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} \\ 0 \end{bmatrix} V_{ch} \quad (II.14)$$

II.3.2 Sélection des paramètres du filtre LC (non-connecté)

➤ Puissance de la charge coté AC P_{AC} :

$$P = \frac{V_m^2}{R} = \frac{(311.12)^2}{55} = 1.758 \text{ kW}$$

➤ Sélection de l'inductance et de la capacité du filtre associé :

On a :

$$\Delta I_{max} = [0.2 - 0.25] I_{max}$$

$$L_f = \frac{V_{dc}}{4 \Delta I_{max} f_s} = 5.5 \text{ mH}$$

$$C_f = \frac{1}{L_f * \omega^2} = 150 \mu F$$

On donne : $I_{eff} = 11.6 \text{ A}$, $f_s = 10^3 \text{ Hz}$, $V_{dc} = 500 \text{ V}$ et $R = 20 \text{ ohm}$

II.3.3 Sélection des paramètres du Filtre LCL amorti et non-amorti (connecté)

II.3.3.1 Critères de conception du filtre

• Courant crête nominale :

$$I_{nom} = P_s V_{res} = 1758 \times 311.13 \approx 11.25 \text{ A}$$

• Ondulation maximale admissible (20% de I_{nom}) :

$$\Delta I = 0.2 \times 11.25 = 2.25 \text{ A}$$

II.3.3.2 Sélection de l'inductance L_1 (côté onduleur)

- Modèle d'ondulation en pont de H :

$$\Delta I \approx \frac{V_{dc}}{8 \cdot f_{sw} \cdot L_1 \Delta I} \quad (\text{II.15})$$

- Réarrangement pour L_1 :

$$L_1 = \frac{V_{dc}}{8 \cdot f_{sw} \cdot \Delta I} = \frac{400}{8 \times 20 \times 103 \times 2.25} = 1.111 \text{ mH}$$

II.3.3.3 Sélection de l'inductance L_2 (côté réseau)

Par Hypothèse de symétrie et afin de garantir une répartition égale de l'atténuation des harmoniques on pose : $L_1 = L_2$

II.3.3.4 Sélection de la capacité du filtre C_f

- Fréquence de résonance f_{res} :

$$f_{res} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_f}} \quad (\text{II.16})$$

- Réarrangement pour C_f :

$$C_f = \frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 \cdot (2\pi f_{res})^2} = \frac{2.222 \times 10^{-3}}{(1.111 \times 10^{-3})^2 \times (2\pi \times 2000)^2} = 11.39 \mu F$$

pour garantir la stabilité du système on doit assurer que : $f_{res} \ll f_{sw}$

II.3.3.5 L'amortissement critique (pour le filtre LCL amorti)

$$R_d = \frac{1}{3 \cdot 2\pi f_{res} \cdot C_f} = \frac{1}{3 \times 2\pi \times 2000 \times 11.39 \times 10^{-6}} \approx 2.33 \Omega$$

II.3.4 Simulation partie II

II.3.4.1 Commande de l'onduleur

Dans un système photovoltaïque, l'onduleur monophasé représente un composant central du système, chargé de convertir l'électricité continue (DC) produite par les panneaux solaires en électricité alternative (AC) utilisable par les équipements domestiques ou injectée dans le réseau électrique [22]. La commande de l'onduleur vise à garantir que cette conversion se fasse de manière optimale, en respectant les normes de qualité de l'énergie :

- Tension sinusoïdale propre
- Fréquence stable (généralement 50 Hz)

- Amplitude adaptée à la charge ou au réseau
- Faible taux d'harmoniques
- Et gestion efficace de la puissance.

Elle comprend généralement plusieurs blocs fonctionnels :

- Une modulation de largeur d'impulsion (SPWM) ou autre technique avancée.
- Une boucle de régulation pour contrôler la tension ou le courant en sortie.
- Un suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour extraire le maximum d'énergie des panneaux.

L'onduleur utilise des techniques de modulation (schémas ci-dessus), elles lui permettent de sculpter précisément l'énergie continue en une forme alternative utilisable et de haute qualité

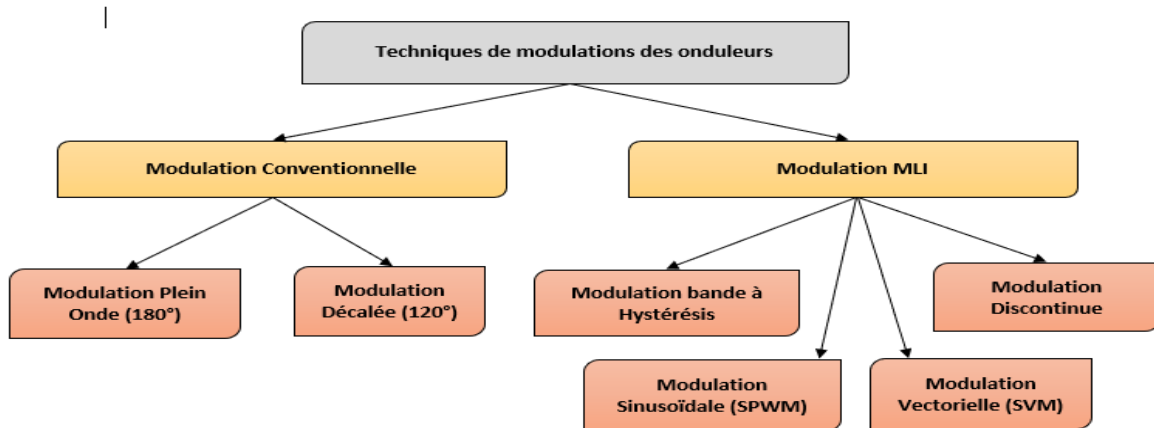


Figure II. 12 : Technique de modulations des onduleurs.

II.3.4.2 Description du système

Un onduleur est un dispositif électronique destiné à convertir le courant continu (DC) en courant alternatif (AC). Lorsqu'il fonctionne en mode isolé, comme illustré à la figure II.14, il alimente uniquement des charges locales sans aucune interaction avec le réseau électrique public.

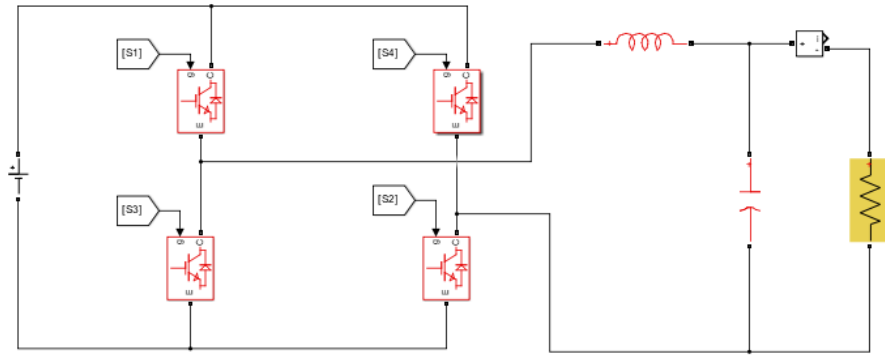


Figure II. 13 : Onduleur non connecte au réseau.

II.3.4.3 Techniques de modulation des onduleurs

II.3.4.3.1 Commande pleine onde (180°)

Pour illustrer le fonctionnement de l'onduleur, il est intéressant d'étudier le Comportement de l'onduleur commande en pleine onde (180°). Ce fonctionnement nous Permet de mieux comprendre les autres stratégies de commandes. Cette commande est Appelée aussi la commande à six étapes [17]. Dans cette technique de commande, on ferme les semi-conducteurs d'une même branche de C'est la stratégie de commande la plus simple à mettre en œuvre. Par contre la tension de sortie est très riche en harmoniques de rang faible et donc de fréquence basse. Le filtrage est difficile dans ce mode de commande, les interrupteurs travaillent à la fréquence des grandeurs électriques de sortie [18].

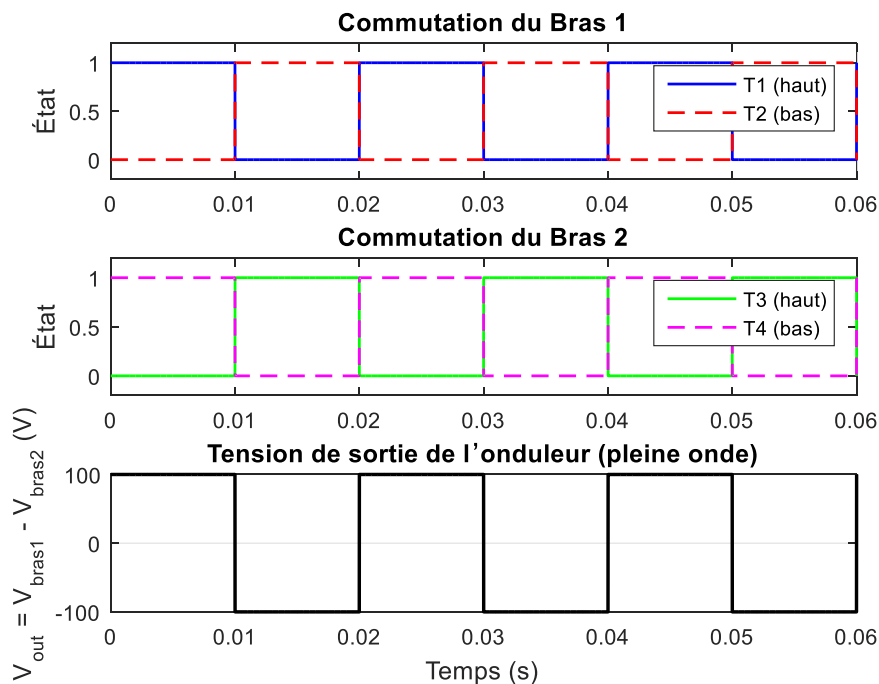


Figure II. 14 : Commande pleine onde (180°) de l'onduleur monophasé.

II.3.4.3.2 Commande décalé (120°)

C'est une commande qui suit le même principe que la précédente, sauf que les interrupteurs conduisent pendant 120°, donc ils sont moins utilisés par rapport à la commande (180°).

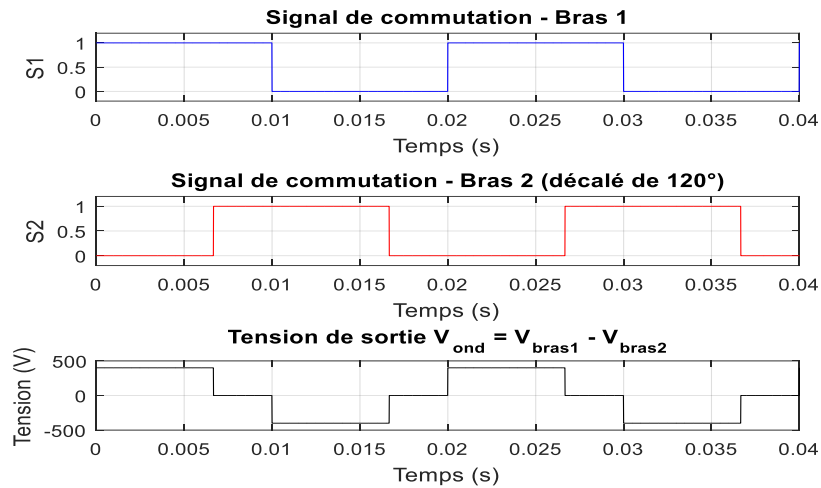


Figure II. 15 : Commande décale (120°) de l'onduleur monophasé.

II.3.4.4 Modulation MLI

La modulation de largeur d'impulsions (MLI ; en anglais : Pulse Width Modulation, soit PWM), est une technique couramment utilisée pour synthétiser des signaux pseudo analogique à l'aide de circuit numérique (tout ou rien 1 ou 0), ou plus généralement à états discrets. MLI unipolaire (meilleures performances EMI, plus de niveaux de tension) ou bipolaire.

II.3.4.4.1 MLI bipolaire

Modulation de largeur d'impulsion bipolaire elle alterne directement la tension entre +V et -V pour construire l'onde alternative

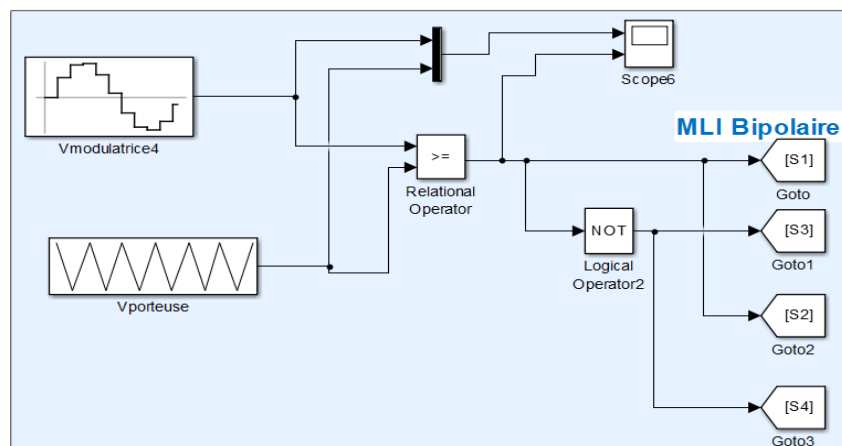


Figure II. 16 : Schéma fonctionnel du principe de la MLI bipolaire.

II.3.4.4.2 Les avantages et inconvénients

❖ Les avantages :

- Implémentation simple (souvent plus facile à mettre en œuvre).
- Moins de commutations (meilleure efficacité de conversion dans certains cas).
- Nécessite moins de logique de contrôle.

❖ Les inconvénients :

- Distorsion harmonique plus élevée.
- Énergie spectrale concentrée à la fréquence de commutation, ce qui rend le filtrage plus difficile.
- Moins bonne qualité de la tension de sortie par rapport à la MLI unipolaire.

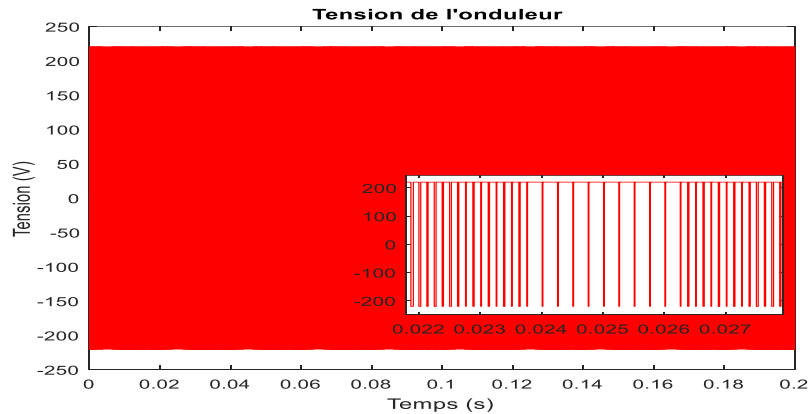


Figure II. 17 : l'allure de tension de l'onduleur.

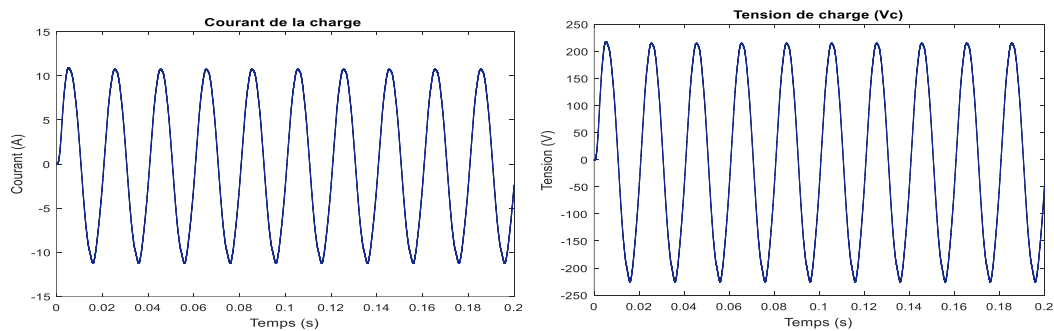


Figure II. 18 : l'allure de courant et tension de la charge.

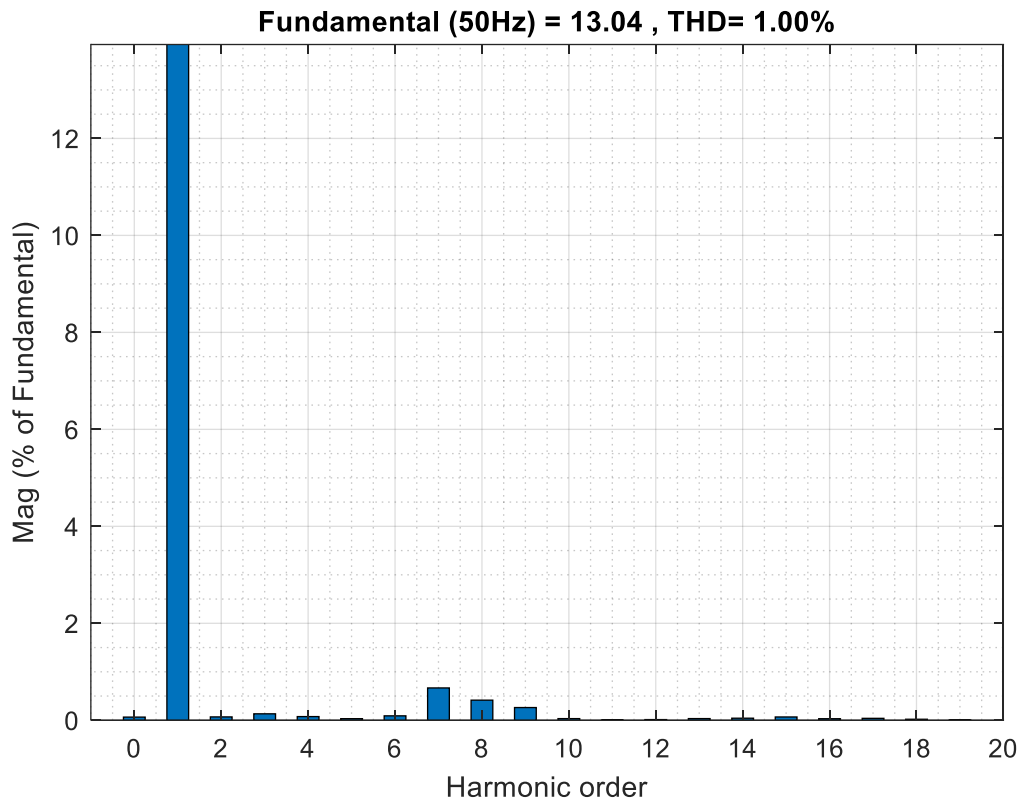


Figure II. 19 : Spectre harmonique de courant.

II.3.4.4.3 Interprétation des résultats

- ✓ **Figure (II.17) :** La tension de sortie de l'onduleur monophasé commandé par une MLI bipolaire alterne entre +200 V et -200 V avec une forme carrée. La zone zoomée montre les commutations rapides. Cette commande simple génère une tension riche en harmoniques, filtrée par des filtres passe bas.
- ✓ **Figure (II.18) :** les allures représentent la tension et courant de la charge d'un onduleur monophasé par une modulation MLI bipolaire.
 - **Courant de charge :** sinusoïdal et régulier, indiquant une bonne efficacité de l'onduleur et une atténuation efficace des harmoniques.
 - **Tension de charge :** sinusoïdale également, adaptée aux équipements sensibles. La MLI bipolaire permet de produire cette tension alternative à partir d'une source continue.
- ✓ **Figure (II.19) :** Le spectre harmonique du courant présente une composante fondamentale dominante, accompagnée d'harmoniques de faible ordre. Un THD de

3,81 % confirme l'efficacité du filtre choisi pour atténuer les harmoniques, garantissant ainsi fiabilité et performance pour les charges alimentées.

II.3.4.4.4 MLI unipolaire

Modulation de largeur d'impulsion unipolaire est une technique de modulation pour onduleur pour chaque moitié de l'onde sinusoïdale (positive ou négatives) fait commuter la tension de sortie uniquement entre zéro et la valeur maximale de la polarité correspondante cela permet d'obtenir une meilleure qualité d'onde en réduisant les harmoniques indésirables, rendant le filtrage plus facile.

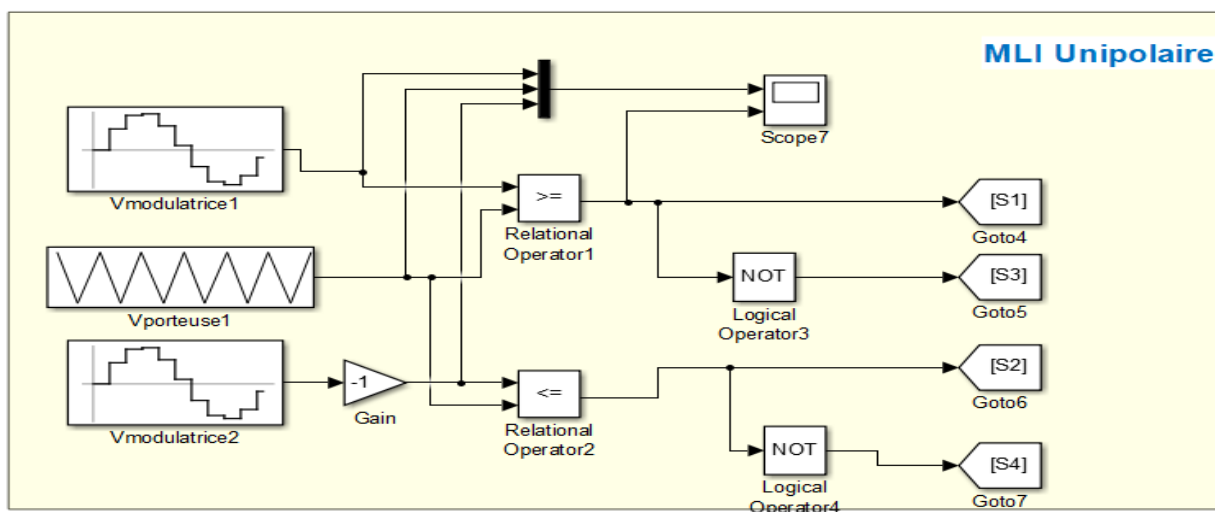


Figure II. 20 : Schéma fonctionnel du principe de la MLI unipolaire.

II.3.4.4.5 Les avantages et inconvénients

❖ Les avantages :

- Moins de distorsion harmonique (THD).
- Filtrage plus facile.
- Réduction des contraintes sur les composants.
- Meilleure efficacité à haute fréquence.
- Tension de sortie plus précise.

❖ Les inconvénients :

- Commande plus complexe.
- Plus de commutations par cycle.
- Stress thermique accru.
- Nécessite un contrôle indépendant des bras du pont.

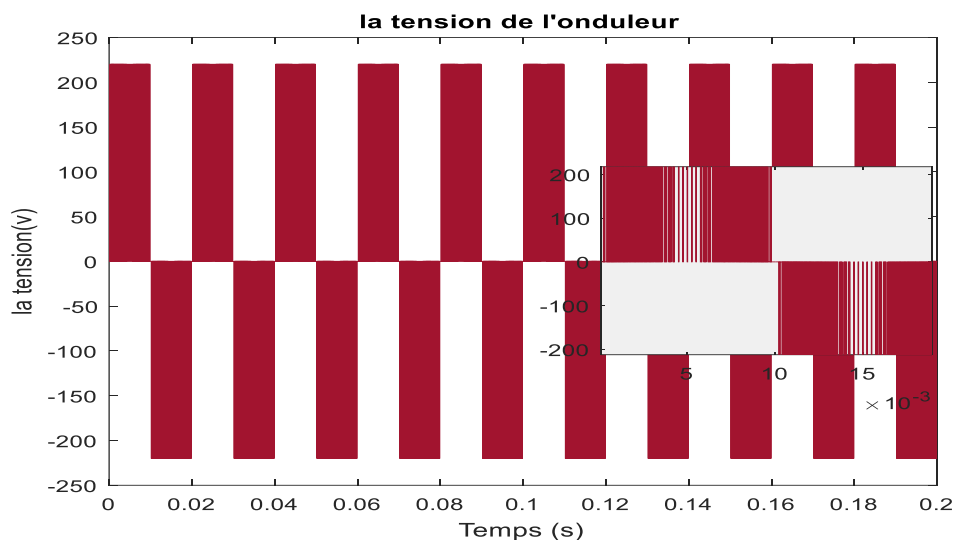


Figure II. 21 : l'allure de tension de l'onduleur.

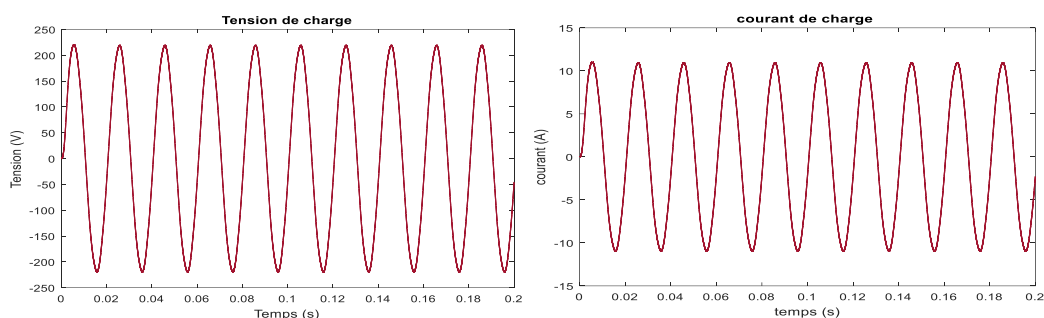


Figure II. 22 : l'allure de tension et courant de la charge.

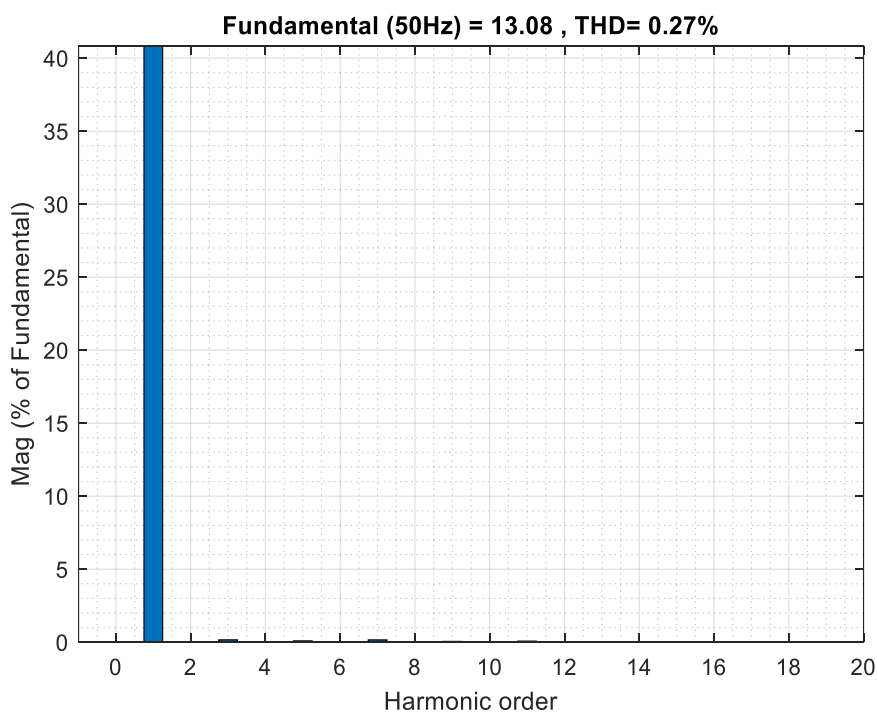


Figure II. 23 : allure de spectre harmonique du courant présente.

II.3.4.4.6 Interprétation des résultats

- ✓ **Figure II.22** : La tension de sortie de l'onduleur avec MLI unipolaire commute entre 0 et ± 220 . Cette modulation permet de réduire les harmoniques par rapport à la MLI bipolaire, améliorant ainsi la qualité du signal et facilitant le filtrage.
- ✓ **Figure II.23** : Les courbes de tension et courant de la charge sont quasi sinusoïdales, bien synchronisées, ce qui indique un excellent fonctionnement de l'onduleur. Cela confirme l'efficacité de la MLI unipolaire et du filtre utilisé pour fournir une alimentation de qualité.
- ✓ **Figure II.24** : Le spectre harmonique du courant présente une composante fondamentale dominante, accompagnée d'harmoniques de faible ordre. Un THD de 3,40 % confirme l'efficacité du filtre choisi pour atténuer les harmoniques, garantissant ainsi fiabilité et performance pour les charges alimentées.

II.4 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a présenté une étude détaillée de la modélisation et du dimensionnement des systèmes photovoltaïques, mettant en évidence les interactions entre les panneaux solaires, les convertisseurs DC/DC, et les onduleurs. Les simulations et les analyses théoriques ont permis de valider les choix techniques, tels que l'utilisation d'algorithmes MPPT pour maximiser la puissance extraite et les modulations MLI pour améliorer la qualité du signal de sortie. Les résultats obtenus démontrent l'importance d'une conception optimisée pour répondre aux exigences des applications réelles, tout en tenant compte des contraintes environnementales et technique

Chapitre 03 : Systèmes photovoltaïques - installations autonomes et connectées au réseau électrique

III.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats des simulations effectuées sur un système photovoltaïque dans deux configurations distinctes : en mode connecté au réseau et en mode isolé. Ces investigations visent à évaluer les performances du système sous différentes conditions d'exploitation ainsi à valider les deux stratégies de commande.

Dans un premier temps, le système photovoltaïque fonctionne en mode autonome, configuration typique pour les installations en sites isolés. Dans ce contexte, l'accent est mis sur la qualité de la tension fournie à la charge ainsi que la régulation de la puissance délivrée aux charges locales.

Ensuite, l'analyse se concentre sur le comportement du système lorsqu'il est connecté au réseau électrique, selon deux configurations couramment adoptées pour l'injection d'énergie solaire dans le réseau public : une configuration avec filtre LCL non amorti et une autre avec filtre LCL amorti, permettant d'améliorer la qualité de la forme d'onde injectée et d'assurer la continuité de production même en cas de baisse de l'ensoleillement.

Les résultats obtenus sont présentés sous forme de courbes et de tableaux comparatifs afin de mettre en évidence les différences de comportement du système selon le mode d'exploitation. Cette analyse permet d'identifier les avantages et les contraintes propres à chaque configuration, contribuant ainsi à une meilleure compréhension et optimisation des systèmes photovoltaïques.

III.2 Partie I : système photovoltaïque non connecte au réseau électrique

III.2.1 Description du système

Comme l'illustre la figure ci-dessous, le système est composé principalement d'un panneau photovoltaïque, d'un convertisseur Boost, d'un onduleur monophasé et d'une charge variable. Ce système assure une conversion optimale de l'énergie solaire en électricité utilisable pour satisfaire la demande de charge. Le panneau PV génère du courant continu (DC) à partir du rayonnement solaire. Ensuite, le courant généré est transmis au convertisseur boost ; l'approche MPPT associée permet une extraction optimale de puissance. L'onduleur monophasé convertit le courant continu en courant alternatif (AC), compatible avec les appareils électriques alimentant directement la charge.

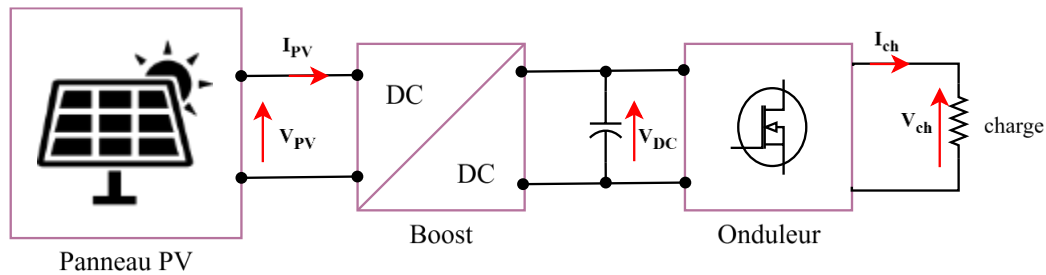


Figure III. 1 Schéma fonctionnel de la chaine de conversion photovoltaïque non-connecte au réseau

III.2.2 L'approche de contrôle utilisée

III.2.2.1 Commande en tension de l'onduleur

Le schéma de commande illustré en figure (III.2) concerne un onduleur monophasé autonome, destiné à alimenter une charge isolée en produisant une tension alternative sinusoïdale à partir d'une source continue. Le système repose sur une boucle de régulation en tension, dans laquelle la tension de sortie est comparée à une référence sinusoïdale générée localement. L'erreur entre ces deux signaux est traitée par un régulateur PI dont la sortie pilote un modulateur PWM assurant la commutation des interrupteurs de l'onduleur en pont complet. Un filtre LC en sortie permet d'éliminer les harmoniques de commutation, garantissant une tension de sortie conforme aux exigences de qualité pour la charge [23].

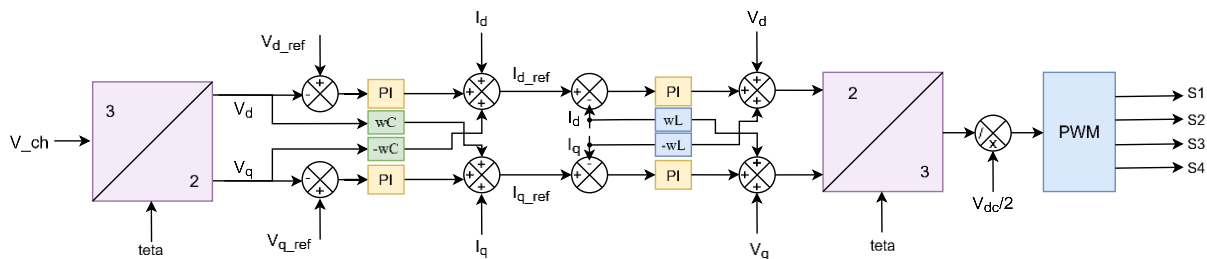


Figure III. 2 Diagramme fonctionnel de la commande en tension d'un onduleur

B. Transformation de Park directe et inverse

➤ Transformation directe

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix}$$

➤ Transformation inverse

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}$$

C. Régulateur PI

$$G(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right)$$

III.3 Partie II : système photovoltaïque connecté au réseau électrique

III.3.1 Description du système

Comme l'illustre la figure ci-dessous, le système est composé principalement d'un panneau photovoltaïque, d'un convertisseur Boost et d'un onduleur monophasé connecté au réseau. Ce système assure une conversion optimale de l'énergie solaire en électricité utilisable pour l'injection au réseau. Le panneau photovoltaïque génère du courant continu (DC) à partir du rayonnement solaire. Ensuite, le courant généré est transmis au convertisseur boost ; l'approche MPPT associée permet une extraction optimale de puissance. L'onduleur monophasé convertit le courant continu en courant alternatif (AC). L'approche de commande associée permet de stabiliser le bus DC et assure une bonne injection d'énergie au réseau.

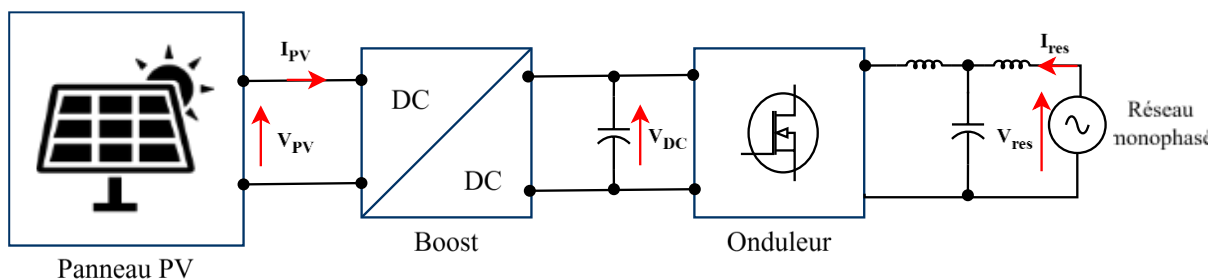


Figure III. 3 schéma fonctionnel de la chaîne de conversion photovoltaïque connectée au réseau

III.3.2 Boucle de verrouillage de phase (PLL)

Un oscillateur harmonique PLL (Phase-Locked Loop) est un type de PLL qui se verrouille sur une harmonique (multiple entier) d'un signal de référence plutôt que sur la fréquence fondamentale.

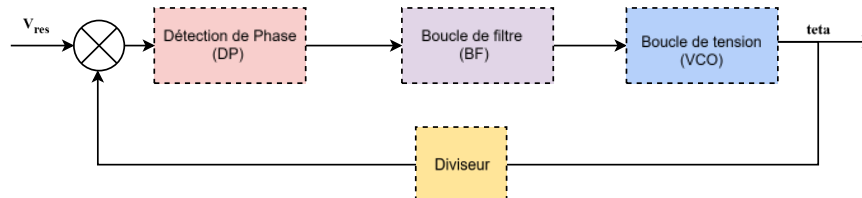


Figure III. 4 Boucle de verrouillage de phase PLL

- **Détecteur de phase (DP)** : charge de générer un signal proportionnel à la différence de phase entre un signal d'entrées et le signal génère par le VCO.
- **Oscillateur contrôlé en tension (VCO)** : Génère un signal périodique dont la fréquence est décalée par rapport à une fréquence de base donné.

- **Diviseur de fréquence** : Divise la sortie de l'VCO par N pour faire correspondre la fréquence de référence à la comparaison de phase.
- **Boucle du filtrage** : la tâche de cette boucle est d'atténuer les composantes haute fréquence de sortie PD [17]

III.3.3 L'approche de contrôle employée

III.3.3.1 Commande en courant de l'onduleur

Le schéma présenté illustre une stratégie de commande vectorielle appliquée à un onduleur monophasé connecté au réseau. Un verrouillage de phase (PLL) extrait l'angle de synchronisation θ , utilisé pour transformer les courants monophasés mesurés en composantes $\alpha\beta$ via une transformée de Clarke, puis en composantes dq à l'aide de la transformée de Park. Dans ce repère synchronisé, deux régulateurs PI assurent le contrôle indépendant des composantes de courant i_d et i_q , avec ajout de termes wL de compensation croisée inductive. Les tensions de commande sont ensuite reconverties vers le repère $\alpha\beta$, puis vers le repère monophasé via les transformations inverses. Enfin, un bloc PWM génère les signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur, assurant une injection de courant synchronisée et conforme aux exigences réseau [24].

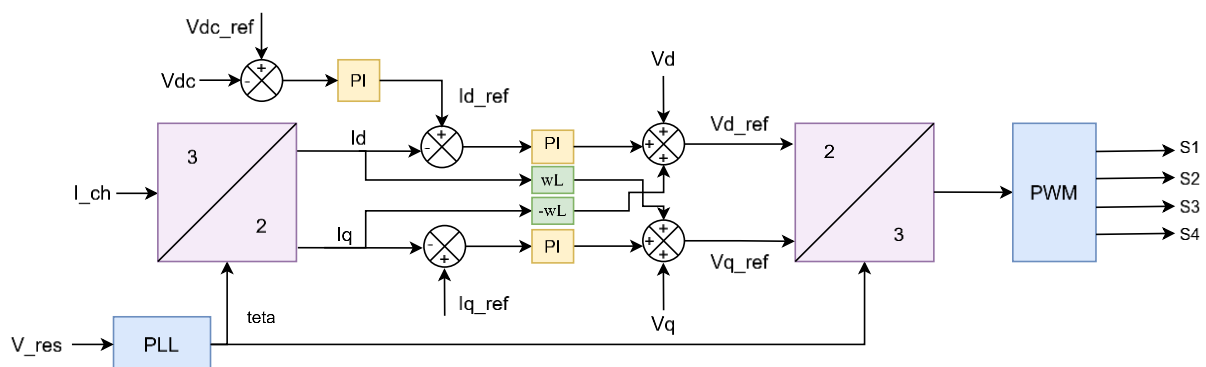


Figure III. 5 commande en courant de l'onduleur

III.3.4 Etude de filtre LCL amorti et non amorti

A. Filtre LCL non amorti

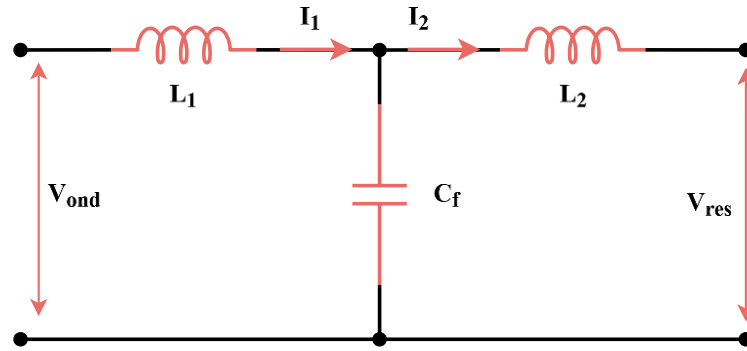


Figure III. 6 schéma de filtre LCL non-amorti

- **Equations en tension :**

$$V_{dc} = L_1 \frac{di_1}{dt} + V_C \quad (\text{III.1})$$

$$V_C = L_2 \frac{di_2}{dt} + V_{res} \quad (\text{III.2})$$

- **Equation en courant :**

$$I_1 = I_2 + C_f \frac{dV_C}{dt} \quad (\text{III.3})$$

$$I_1 = I_2 + C_f \frac{dV_C}{dt} \quad (\text{III.4})$$

Fonction de transfert $G_{LCL}(s)$

En transformant les équations dans le domaine de Laplace (s) :

$$V_{dc}(s) = L_1 s I_1(s) + V_C(s) \quad (\text{III.5})$$

$$V_C(s) = L_2 s I_2(s) + V_{res}(s) \quad (\text{III.6})$$

Equations du courant capacitifs :

$$I_1 = I_2 + C_f \frac{dV_C}{dt} \quad (\text{III.7})$$

En substituant $I_1(s)$ et $V_C(s)$:

$$V_{dc}(s) = L_1 s \left(I_2(s) + C_f s (L_2 s I_2(s) + V_{res}(s)) \right) + L_2 s I_2(s) + V_{res}(s) \quad (\text{III.8})$$

En considérant $V_{res}(s)$ comme une perturbation nulle pour la FT :

$$V_{dc}(s) = I_2(s) (L_1 s + L_1 L_2 C_f s^3 + L_2 s) \quad (\text{III.9})$$

La fonction de transfert est donnée par :

$$G_{LCL}(s) = \frac{I_2(s)}{V_{dc}(s)} = \frac{1}{L_1 L_2 C_f s^3 + (L_1 + L_2)s} \quad (\text{III.10})$$

B. Filtre LCL amorti

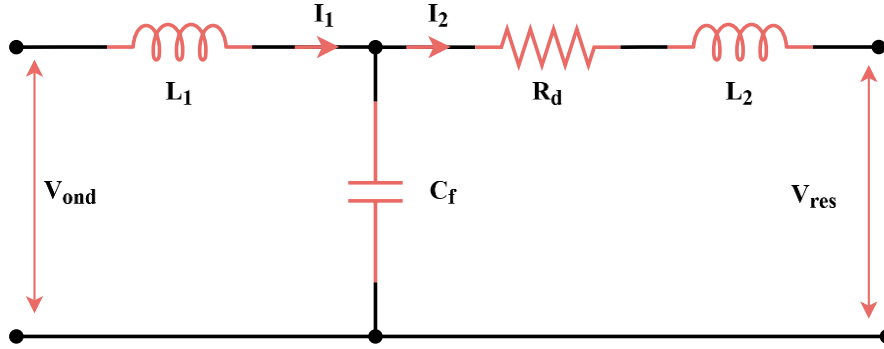


Figure III. 7 schéma de filtre LCL amorti

- Equations en tension

$$V_{dc} = L_1 s I_1(s) + V_C(s) \quad (\text{III.11})$$

$$V_C = R_d i_c + \frac{1}{C_f} \int i_c dt = L_2 s I_2(s) + V_{res}(s) \quad (\text{III.12})$$

- Equation en courant capacitif :

$$I_c = I_1 - I_2 \quad (\text{III.13})$$

$$v_c = (R_d + \frac{1}{C_f s})(I_1(s) - I_2(s)) \quad (\text{III.14})$$

En substituant $V_C(s)$ dans la maille 1 :

$$V_{dc}(s) = L_1 s I_1(s) + \left(R_d + \frac{1}{s C_f}\right)(I_1(s) - I_2(s)) \quad (\text{III.15})$$

Résolution pour $I_1(s)$ et substitution dans la maille 2 :

$$I_1(s) = \frac{V_{dc}(s) + \left(R_d + \frac{1}{C_f s}\right) I_2(s)}{L_1 s + R_d + \frac{1}{s C_f}} \quad (\text{III.16})$$

Finalement, en combinant avec $V_C(s) = L_2 s I_2(s)$ (si $V_{res} = 0V$)

$$G_{LCL-d} = \frac{I_2(s)}{V_{dc}(s)} \quad (\text{III.17})$$

$$G_{LCL-d}(s) = \frac{R_d C_f s + 1}{L_1 L_2 C_f s^3 + \left(L_1 + L_2 + R_d C_f (L_1 + L_2)\right) s^2 + \left(\frac{R_d (L_1 + L_2)}{L_1 + L_2} + \frac{1}{C_f}\right) s} \quad (\text{III.17})$$

III.4 Résultats et interprétations

III.4.1 Cas I : système photovoltaïque non-connecté au réseau électrique

➤ Charge purement résistive (R)

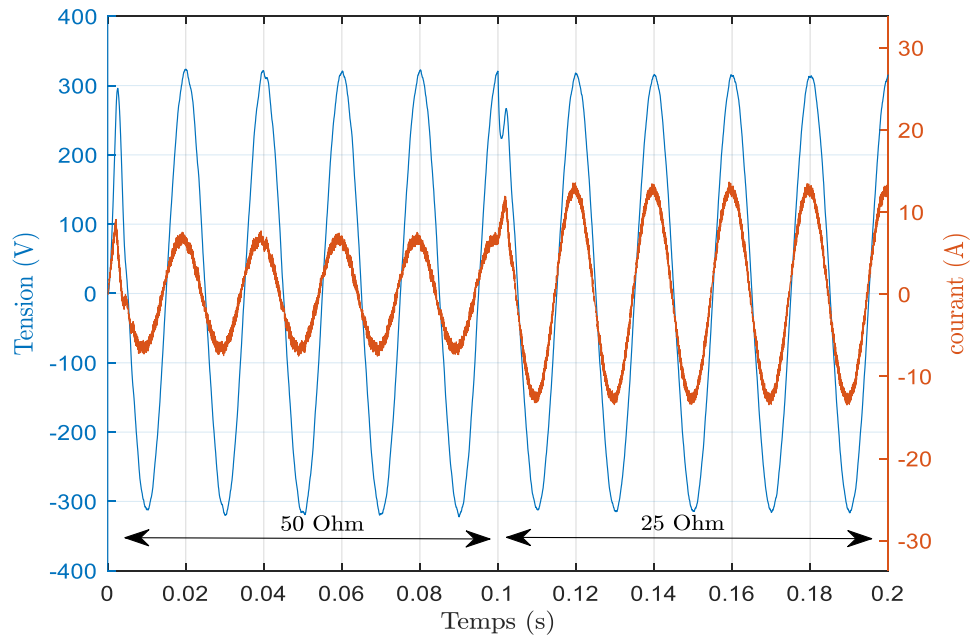


Figure III. 8 Allures de tension et de courant de charge.

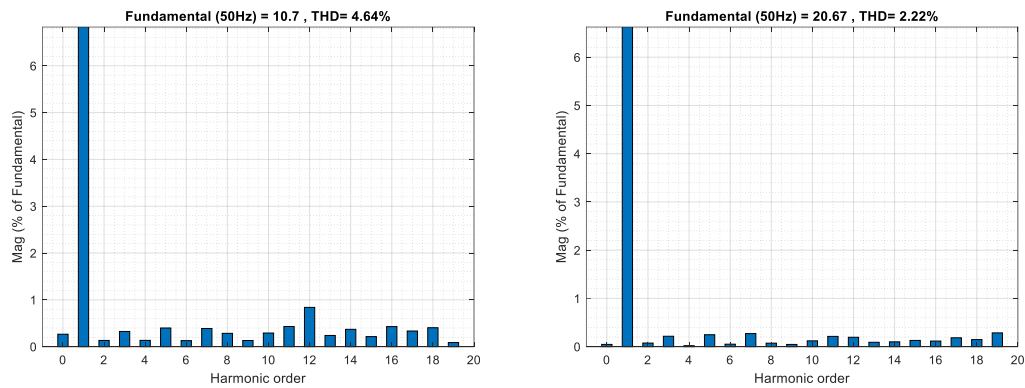


Figure III. 9 THD avant et après la variation de la charge R (non-connecté)

➤ Avec une charge RL

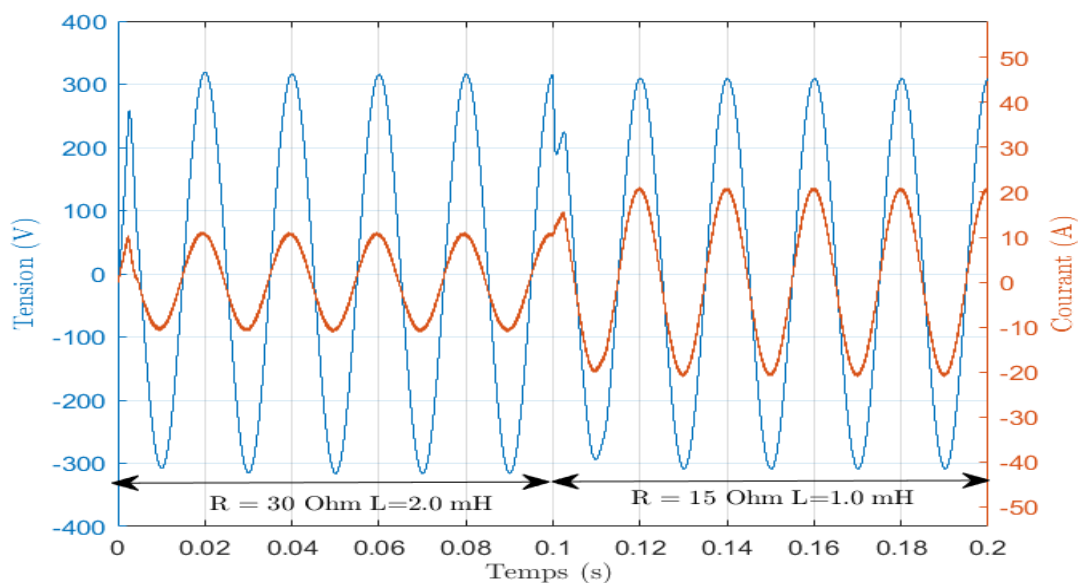


Figure III. 10 Allures de tension et courant avant et après la variation de charge.

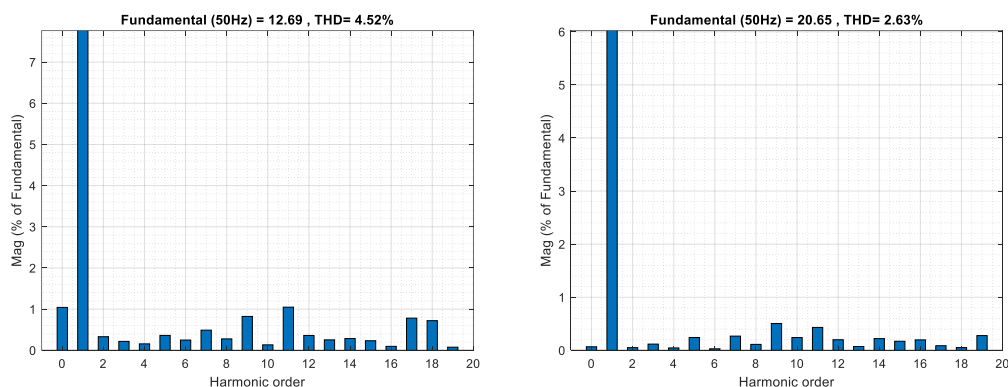


Figure III. 11 THD avant et après la variation de la charge RL (non-connecté)

Tableau III. 1 Comparaison des Performances avec charge R et charge RL

	Charge R		Charge RL	
Variation	Avant	Après	Avant	Après
Puissance active (W)	1981	3746	1980	3750
Puissance réactive (VAR)	0	0	0	0
THD (%)	4.64	2.22	4.52	2.63

Interprétations des résultats

➤ Avec une charge purement résistive

- **Figure III.8 :** la figure présente allures de la tension et du courant de charge avant la variation de charge, la tension reste globalement sinusoïdale, mais le courant présente des pics indiquant la présence d'harmoniques. Après la variation de charge

(modification de la résistance), le courant devient plus régulier et plus en phase avec la tension., le changement de résistance influence directement l'amplitude du courant et améliore sa forme sinusoïdale.

- **Figure III.9 :** La figure présente taux de distorsion harmoniques avant et après variation de charge. Avant la variation de charge, le THD est de 4.64 %, indiquant une distorsion harmonique modérée. Après la variation, le THD diminue à 2.22 %, montrant une nette amélioration de la qualité du courant. La réduction du THD montre que la charge résistive réduit les distorsions et stabilise la forme d'onde.

➤ **Avec une charge RL**

- **Figure III.10 :** présente les formes d'onde de la tension et du courant en sortie d'un onduleur monophasé alimentant successivement deux charges RL variables. Avant la variation, le courant présente un déphasage visible par rapport à la tension à cause de la composante inductive et Après la variation (changement de R et L), le courant devient plus sinusoïdal, mais un léger déphasage persiste à cause de l'inductance. Le comportement inductif provoque une onde de courant plus étalée dans le temps par rapport à la tension.
- **Figure III.11 :** La figure présente taux de distorsion harmoniques avant et après variation de charge RL Avant la variation de la charge RL, le THD est de 4.52 %, indiquant une distorsion harmonique existante. Après la variation, le THD diminue à 2.63 %, montrant une amélioration, mais moins importante que dans le cas purement résistif. La présence d'une inductance limite la réduction totale des harmoniques. Pour la comparaison des performances, la puissance active augmente après la variation dans les deux cas (R et RL), en cohérence avec l'augmentation de la charge. Ensuite, la puissance réactive est indiquée nulle dans les deux cas, ce qui suggère soit une compensation parfaite, soit une simplification de la mesure. Puis le THD diminue après la variation, montrant une amélioration de la qualité du signal électrique. Donc la réduction du THD est plus importante avec une charge purement résistive.

III.4.2 Cas II : système photovoltaïque connecté au réseau

III.4.2.1 Comparaison entre filtre LCL amorti et non-amorti

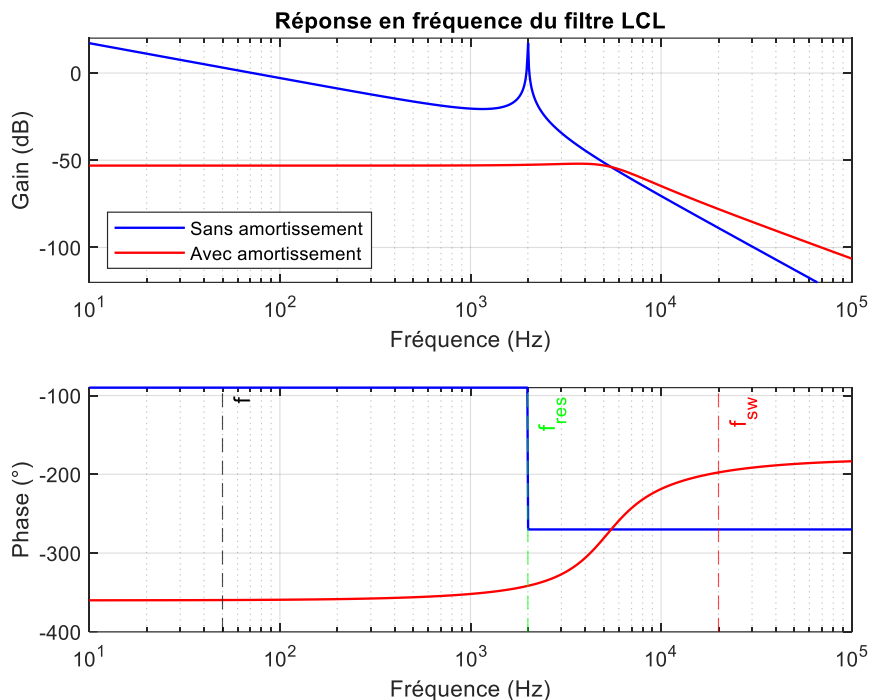


Figure III. 12 le tracé de Bode du filtre LCL avec et sans amortissement

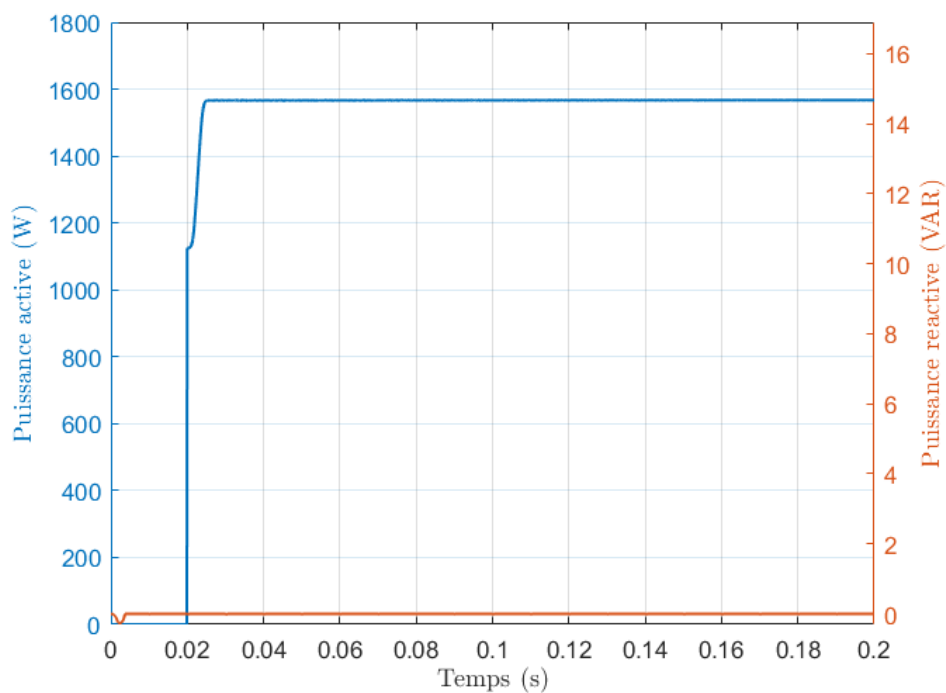


Figure III. 13 Courbe de puissance active et réactive filtre non-amorti

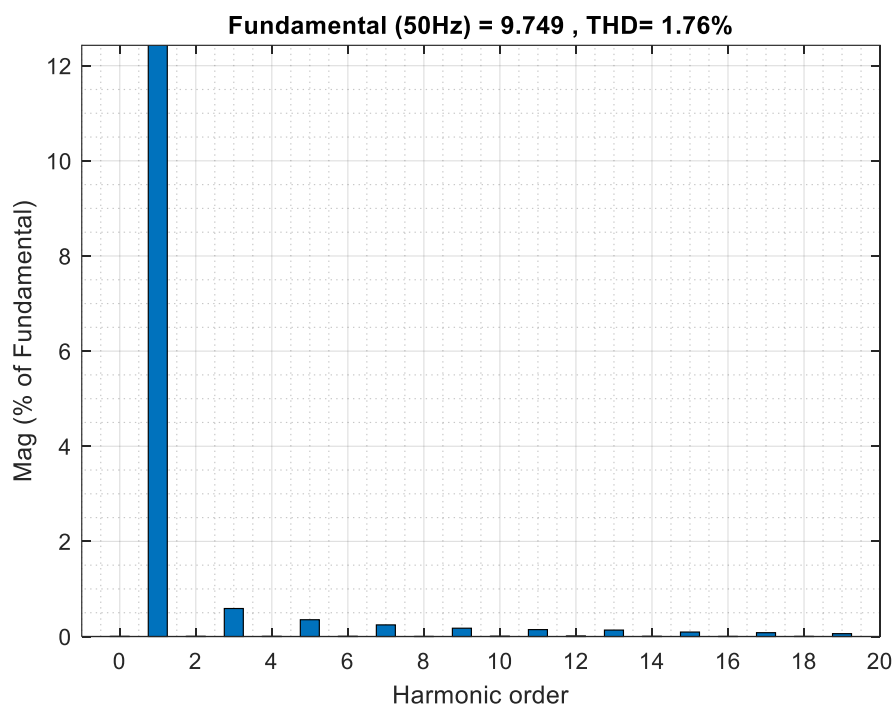


Figure III. 14 THD du courant de réseau sous un filtre non-amorti

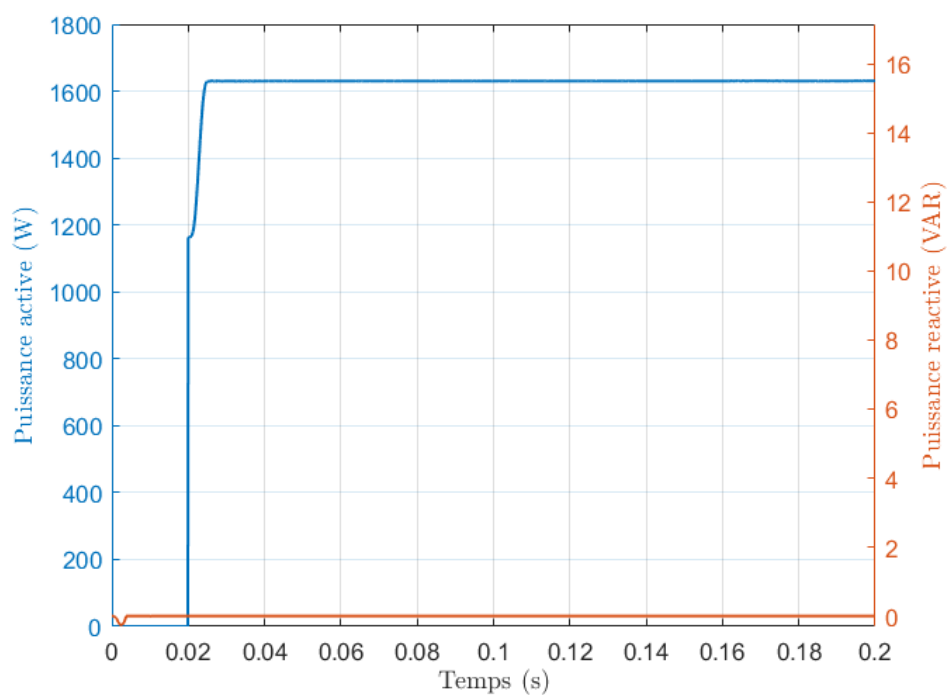


Figure III. 15 Courbe de puissance active et réactive filtre amorti

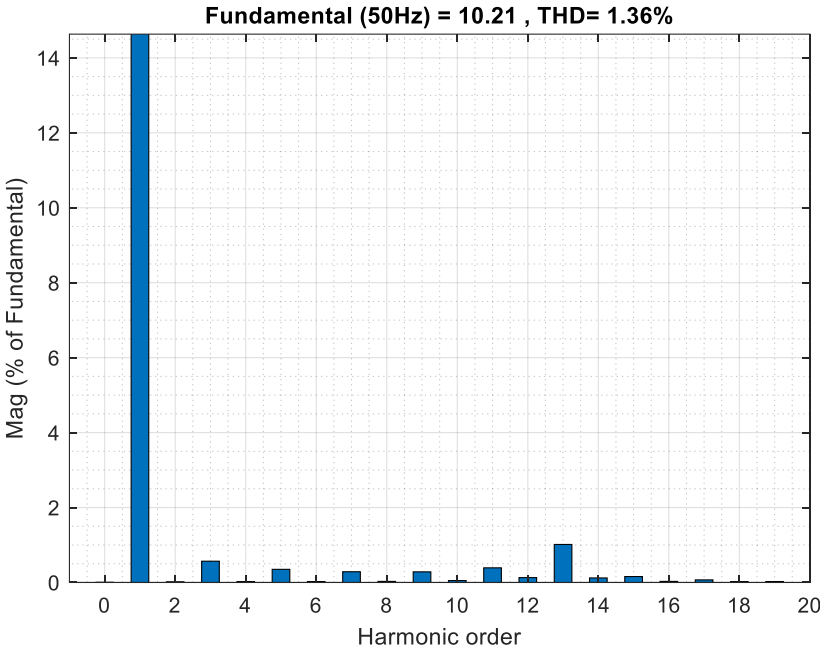


Figure III. 16 THD du courant de réseau sous un filtre amorti

Tableau III. 2 Comparaison des Performances avec et sans amortissement

Grandeur		Filtre LCL non-amorti	Filtre LCL amorti
Puissance active (W)		1567	1600
Puissance réactive (VAR)		0	0
THD (%)		1.73	1.36
Fréquence	20 kHz	-88.82 dB	-77.99 dB
	2 kHz	15.14 dB	-52.61 dB

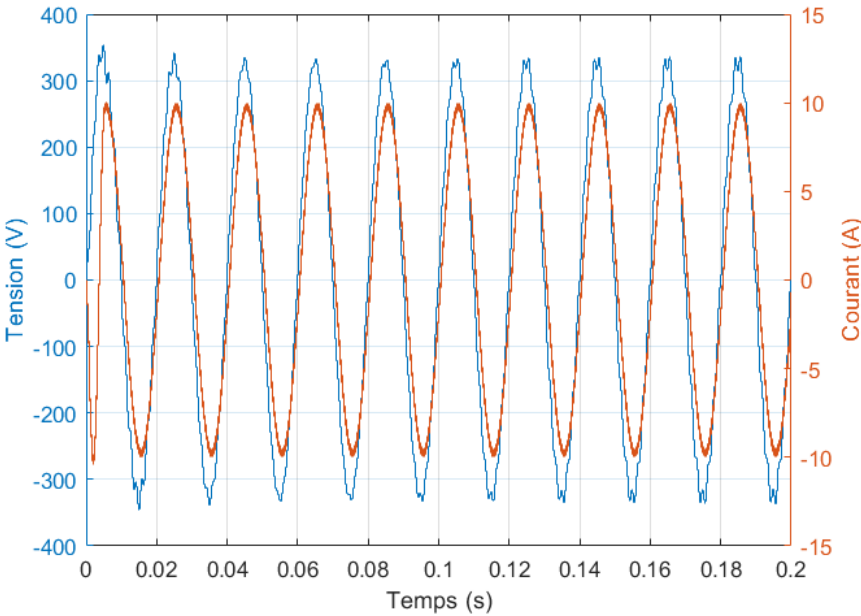


Figure III. 17 Allure de tension et courant du réseau

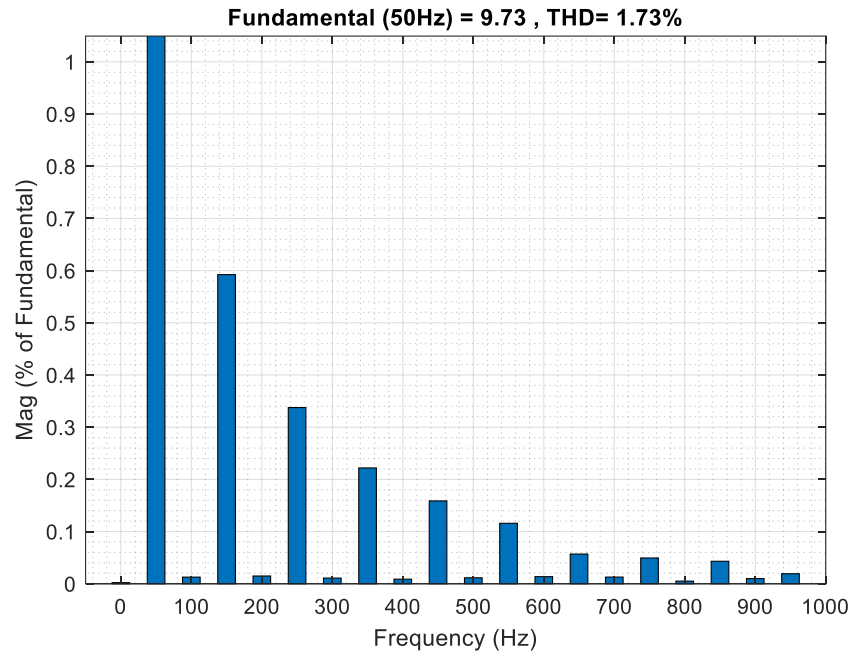


Figure III. 18 Taux de distorsion harmonique lors de la connexion au réseau

Interprétations des résultats :

- ✓ **La figure III.12** : montre le tracé de Bode du filtre LCL. Sans amortissement (courbe bleue), on observe un pic à 2 kHz correspondant à la résonance. Avec amortissement (courbe rouge), ce pic disparaît grâce à la dissipation d'énergie par la résistance, offrant ainsi une meilleure stabilité.
- ✓ Les résultats obtenus (figure III.13, figure III.14, figure III.15 et figure III.16) mettent en évidence l'impact de l'amortissement du filtre LCL sur la qualité de l'énergie injectée au réseau. Sans amortissement, la puissance active atteint une valeur stable de 1567 W avec une puissance réactive quasi nulle, traduisant un bon transfert d'énergie active. Toutefois, le spectre harmonique révèle la présence d'harmoniques de faible amplitude, avec un THD de 1,76 %. L'ajout d'un amortissement permet d'améliorer significativement ces performances. La puissance active passe alors à 1600 W, et le THD est réduit à 1,36 %, garantissant ainsi une meilleure qualité du courant injecté. De plus, l'atténuation au niveau de la fréquence de résonance passe de 15,14 dB à -52,61 dB, ce qui limite efficacement les phénomènes de résonance et améliore la stabilité du système. Ces résultats confirment donc l'intérêt d'utiliser un filtre LCL amorti pour assurer un fonctionnement optimal et conforme aux exigences de qualité de l'énergie.

- ✓ **La figure III.17:** illustre les formes d'onde de tension et courant injectés. La tension est parfaitement sinusoïdale et synchronisée avec le réseau, tandis que le courant suit la même forme et fréquence, traduisant une injection efficace de puissance active.
- ✓ Enfin, le spectre fréquentiel (figure III.18) montre une fondamentale dominante à 50 Hz avec un THD faible (1,73 %), confirmant la bonne qualité du signal injecté et la performance du filtrage mis en œuvre.

III.5 Conclusion

Cette étude a permis d'analyser de manière rigoureuse le comportement d'un système photovoltaïque dans deux contextes d'exploitation : en mode autonome et en mode connecté au réseau. Les résultats obtenus ont validé l'efficacité des stratégies de commande mises en œuvre, en assurant à la fois une alimentation fiable des charges locales en site isolé et une injection conforme de l'énergie dans le réseau électrique. Par ailleurs, l'évaluation comparative des configurations avec filtres LCL non amorti et amorti a mis en évidence l'impact du filtrage sur l'amélioration de la qualité de l'énergie injectée. Ces travaux apportent ainsi une contribution pertinente à l'optimisation des systèmes photovoltaïques, en vue d'une meilleure intégration des énergies renouvelables dans les réseaux électriques.

Conclusion générale

À travers ce travail, une étude approfondie a été menée sur les différentes étapes de la chaîne de conversion photovoltaïque, depuis le générateur solaire jusqu'à l'injection de l'énergie dans le réseau ou l'alimentation de charges isolées. La modélisation, le dimensionnement des composants, ainsi que les stratégies de commande associées ont été développés afin de garantir une performance optimale du système.

L'analyse comparative entre les systèmes connectés et isolés a permis de mettre en évidence les spécificités, avantages et contraintes de chaque configuration. L'étude des filtres LCL amortis et non amortis a également apporté des éléments de compréhension essentiels pour améliorer la qualité de l'énergie injectée dans le réseau et limiter les effets indésirables liés aux harmoniques.

Les résultats obtenus, issus de simulations rigoureuses, ont permis de valider les choix techniques et les stratégies de contrôle proposées. Ils constituent une base solide pour le développement de systèmes photovoltaïques performants, adaptés aux exigences des applications domestiques ou industrielles, que ce soit en site isolé ou en injection réseau.

Enfin, ce travail ouvre la voie à des perspectives d'amélioration, notamment en intégrant des techniques de commande avancées (intelligence artificielle, contrôle prédictif) ou en envisageant l'hybridation avec d'autres sources renouvelables, afin de répondre aux besoins croissants en énergie propre et durable.

Bibliographie

- [1] K. Loucif, «Étude et simulation d'un convertisseur DC/AC pour un système PV connecté au réseau,» Mémoire fin d'étude, Université A. MIRA - Béjaia , 2024.
- [2] O. . MOUSSOUNINasser Eddine, « Etude et réalisation d'un onduleur de tension monophasé,» Diplome Master, Université Abderrahmane MIRA- BEJAIA, 2017.
- [3] Y. Riffonneau, «Gestion des flux énergétique dans un système photovoltaïque avec stockage connecte au réseau,» Thèse de Doctorat de l'Université Joseph Fourier, 2009.
- [4] A. Postor, « Evaluation comparative de chargeurs de batteries pour systèmes photovoltaïques,» Projet de fin d'études, Université Toulouse, 2002.
- [5] M. MEZIANI, «Contribution à la modélisation analytico-numérique des transformateurs de puissance,» Université Mouloud MAMMERI, 2011.
- [6] M. S. A. e. al, «High-Level Penetration of Renewable Energy with Grid: Challenges and Opportunities,» 2020.
- [7] F. R. Y. e. al, «Communication Systems for Grid Integration of Renewable Energy Resources,» 2011.
- [8] M. S. A. e. al, «Section sur la FRT et la stabilité,» 2020.
- [9] Z. F. e. al, «Smart Grid Communications: Overview of Research Challenges, Solutions, and Standardization Activities,» 2011.
- [10] M. A, Article MPPT techniques for photovoltaic applications, September 20113.
- [11] M. e. a. Bobrowska-Rafal, Grid synchronization and symmetrical components extraction with PLL algorithm for grid connected power electronic converters-a review, Bulletin of the Polish Academy of Sciences : Technical Sciences 4, 2014.
- [12] T. E. B. S. J. Royer, «Le pompage photovoltaïque,» Institut de l'Energie Des Pays Francophone, 1998.
- [13] M. V. A. Lobouret, «Energie solaire photovoltaïque,» Edition Dunod, 2006.
- [14] B. O. Larbès C, «Etude comparative entre les différents topologies et les commandes des onduleurs,» Mémoire master en électronique. Ecole national polytechnique, 2015.
- [15] L. A. AZIEZE Tayeb, «Intégration d'un onduleur photovoltaïque au réseau électrique et étude de sastabilité,» Mémoire Master, Centre Universitaire BOUSSOUF Abdelhafid - Mila, 2024.
- [16] M. Messoude, «Etude et optimisation d'un modèle de conversion d'énergie photovoltaïque application au pompage,» Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2006.

- [17] Bobrowska-Rafal, M., et al. "Grid synchronization and symmetrical components extraction with PLL algorithm for grid connected power electronic converters-a review." Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences 4 (2011)
- [18] Mohammed, Nabil, et al. "Grid-forming inverters: A comparative study of different control strategies in frequency and time domains." IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society 5 (2024)
- [19] Jain, Rohit Kumar, Venugopal Reddy Barry, and Harish Kumar Varma Gadiraju. "An effective control strategy for single-phase single-stage PV grid-tied inverter under abnormal grid conditions." IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics 12.2 (2023)
- [20] Cortajarena, José Antonio, et al. "Sliding mode control of grid-tied single-phase inverter in a photovoltaic MPPT application." Solar Energy 155 (2017)
- [21] Ali, Ahmed IM, Mahmoud A. Sayed, and Essam EM Mohamed. "Modified efficient perturb and observe maximum power point tracking technique for grid-tied PV system." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 99 (2018)
- [22] Özbay, Harun, Selim Öncü, and Metin Kesler. "SMC-DPC based active and reactive power control of grid-tied three phase inverter for PV systems." International Journal of Hydrogen Energy 42.28 (2017)
- [23] Nannam, Hari Charan, and Atanu Banerjee. "A novel control technique for a single-phase grid-tied inverter to extract peak power from PV-Based home energy systems." AIMS Energy 9.3 (2021)
- [24] Yang, Zhiqing, et al. "Stability investigation of three-phase grid-tied PV inverter systems using impedance models." IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics 10.3 (2020)

Résumé

Dans un contexte de transition énergétique, l'intégration de l'énergie solaire photovoltaïque représente une solution stratégique, bien que confrontée à des défis techniques majeurs. L'intermittence de la production, due aux variations climatiques, et les exigences strictes d'injection dans le réseau nécessitent des solutions avancées pour garantir stabilité et performance. Ce mémoire analyse les problématiques liées à l'optimisation de l'injection d'énergie, à la gestion des fluctuations de production, et à la fiabilité en mode îloté. Une étude comparative approfondie des systèmes connectés et isolés est menée, avec un accent sur la synchronisation réseau (PLL) et les performances des filtres LCL, qu'ils soient amortis ou non. Les résultats obtenus permettent de proposer des stratégies de commande et des architectures adaptées, contribuant à l'amélioration de l'efficacité énergétique, de la stabilité dynamique et de la résilience des systèmes photovoltaïques selon les contextes d'utilisation.

Mots clés : Systèmes photovoltaïques, Onduleurs connectés au réseau, Fonctionnement en îlotage, Filtre LCL

Abstract

In the context of energy transition, the integration of photovoltaic (PV) solar energy has emerged as a key solution, despite significant technical challenges. These include the intermittent nature of solar production affected by climatic variations and strict grid injection requirements to ensure power quality and system stability. This thesis addresses three core issues: optimizing power injection in compliance with grid codes, managing production fluctuations, and ensuring reliability in islanded (off-grid) operation. A comparative analysis of grid-connected and standalone PV systems is conducted, with particular focus on grid synchronization (via PLL) and the performance of LCL filters, both damped and undamped. The results lead to tailored control strategies and system configurations aimed at enhancing the energy efficiency, dynamic stability, and resilience of photovoltaic systems across diverse operating scenarios.

Keywords: Photovoltaic Systems, Grid-Connected Inverters, Islanded Operation, LCL Filter