الجمهـوريـــة الجزائـريـــة الديمقـراطيـــة الشـعبيـــة
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التـــعلـيـــم العـــالـــي والبـحـــث العـلمـــي
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أ حمد
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle
Département de Génie Indistruelle

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industrielle

Spécialité : Maintenance de l'Automatisme et de l'Instrumentation

Thème :

Etude conceptuelle des convertisseurs DC-AC à haut rendement dédiés aux systèmes photovoltaïques.

Présenté et soutenu par :

- ✓ Lounis Said Omar.
- ✓ Khaldi Abderrahim.

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade	Etablissement	Qualité
		IMSI-UNIV. D'ORAN 2	
BENABED KHADIDJA		IMSI-UNIV. D'ORAN 2	**Encadreur**
		IMSI-UNIV. D'ORAN 2	

Année Universitaire: 2024/2025

Remerciements

Louange à Dieu Tout-Puissant, sans la grâce duquel ce travail n'aurait pu voir le jour. Nous remercions Allah de nous avoir accordé la santé, la patience et la force nécessaires pour mener à bien ce mémoire.

Nous tenons à adresser une gratitude toute particulière à notre encadrante, **Mme BENABED**, pour son accompagnement bienveillant, ses conseils pertinents et son soutien tout au long de ce projet.

Nos sincères remerciements vont aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en évaluant ce mémoire. Leurs expertises et leurs observations précieuses sont d'une grande importance pour la valorisation de ce travail.

À tous ceux qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire, nous adressons nos plus sincères remerciements.

Dédicaces

À nos chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien sans faille, qui ont rendu ce parcours possible.

À nos frères et sœurs, pour leur présence, leur patience et leurs encouragements tout au long de cette aventure.

À nos amis, pour leur amitié sincère, leur motivation et les moments de partage qui ont rendu ce chemin plus agréable.

Nous vous exprimons toute notre reconnaissance et vous dédions ce travail avec affection et respect.

Résumé :

Ce mémoire traite de l'étude des convertisseurs pour systèmes photovoltaïques, en mettant l'accent sur les onduleurs, indispensables pour convertir l'énergie solaire en courant alternatif exploitable. Après une présentation de l'énergie solaire et des systèmes PV, les différents types d'onduleurs sont analysés. Un modèle performant, le Huawei SUN2000-5KTL-L1, est proposé pour les installations résidentielles. Sa performance est ensuite validée par simulation sous MATLAB/Simulink, mettant en évidence son efficacité, sa fiabilité et sa conformité aux exigences actuelles.

Abstract :

This thesis focuses on the study of converters for photovoltaic systems, with particular attention to inverters, which are essential for converting solar energy from DC to usable AC power. After presenting solar energy and PV systems, various inverter types are analyzed. A high-performance model, the Huawei SUN2000-5KTL-L1, is proposed for residential installations. Its performance is then validated through simulation using MATLAB/Simulink, demonstrating its efficiency, reliability, and compliance with current energy standards.

ملخص :

تتناول هذه المذكرة دراسة محولات أنظمة الطاقة الكهروضوئية، مع التركيز على العاكسات، وهي ضرورية لتحويل الطاقة الشمسية إلى تيار متردد صالح للاستخدام. بعد عرض أنظمة الطاقة الشمسية والكهروضوئية، يتم تحليل أنواع ، للتركيبات السكنية. ثم يتم التحقق من أدائه من خلال المحاكاة العاكسات المختلفة. يُقترح نموذج عالي الأداء، هواوي SUN2000-5KTL-L1 . مما يُبرز كفاءته وموثوقيته وامتثاله للمتطلبات الحالية باستخدام MATLAB/Simulink.

Table des matières

Liste des figures ix

Liste des tableaux x

Introduction générale 1

1 Chapitre 1 : Système Photovoltaïque 2
- 1.1 Introduction . . . 2
- 1.2 Les Caractéristiques de l'Énergie Solaire . . . 2
  - 1.2.1 Le Rayonnement Solaire . . . 2
  - 1.2.2 Facteurs influençant l'ensoleillement . . . 5
- 1.3 Les Différentes Formes d'Utilisation de l'Énergie Solaire . . . 7
  - 1.3.1 L'énergie solaire thermique . . . 8
  - 1.3.2 L'énergie solaire photovoltaïque . . . 9
  - 1.3.3 L'énergie solaire chimique . . . 10
- 1.4 Avantages et Inconvénients de l'Énergie Solaire . . . 10
  - 1.4.1 Les avantages de l'énergie solaire . . . 11
  - 1.4.2 Les inconvénients de l'énergie solaire . . . 12
  - 1.4.3 Bilan et perspectives . . . 13
- 1.5 Applications et Perspectives . . . 14
  - 1.5.1 Applications de l'énergie solaire . . . 14
  - 1.5.2 Perspectives de développement de l'énergie solaire . . . 16
- 1.6 Système Photovoltaïque . . . 17
- 1.7 Principe de fonctionnement du système photovoltaïque . . . 18
  - 1.7.1 Effet photovoltaïque . . . 18
  - 1.7.2 Conversion de l'énergie solaire en électricité . . . 19
- 1.8 Caractéristiques électriques des modules photovoltaïques . . . 21
- 1.9 Facteurs influençant le rendement . . . 22
- 1.10 Composants d'un système photovoltaïque . . . 23
  - 1.10.1 Modules et panneaux . . . 23
  - 1.10.2 Régulateur de charge . . . 25
  - 1.10.3 Batterie de stockage . . . 27
  - 1.10.4 Convertisseur . . . 29
- 1.11 Typologies des systèmes photovoltaïques . . . 29
- 1.12 Applications des systèmes photovoltaïques . . . 30
- 1.13 Conclusion . . . 31

2 Chapitre 2 : Convertisseurs DC/AC (Onduleurs) 33
2.1 Introduction . . . 33
2.2 Définition et rôle d'un onduleur . . . 34
2.3 Classification des onduleurs . . . 35
2.3.1 Onduleur monophasé . . . 35
2.3.2 Onduleur triphasé . . . 37
2.4 Techniques de modulation . . . 39
2.4.1 Modulation par largeur d'impulsion (PWM) . . . 40
2.4.2 Autres techniques : MLI vectorielle, modulation à fréquence variable 41
2.5 Composants de puissance utilisés dans les onduleurs . . . 41
2.5.1 Transistors bipolaires à grille isolée (IGBT) . . . 42
2.5.2 Transistors à effet de champ (MOSFET) . . . 43
2.5.3 Diodes de roue libre et filtres LC . . . 44
2.5.4 Choix des composants selon la fréquence de fonctionnement . . . 44
2.6 Critères de performance d'un onduleur . . . 45
2.6.1 Rendement de conversion . . . 45
2.6.2 Distorsion harmonique totale (THD) . . . 46
2.6.3 Réponse dynamique . . . 47
2.6.4 Fiabilité et dissipation thermique . . . 48
2.6.5 Coût et encombrement . . . 48
2.7 Normes et exigences techniques . . . 49
2.7.1 Normes de sécurité et compatibilité . . . 49
2.7.2 Exigences spécifiques aux systèmes photovoltaïques . . . 50
2.7.3 Normes de connexion au réseau électrique . . . 50
2.8 Conclusion . . . 51

3 Chapitre 3 : Les onduleurs dans les systèmes photovoltaïques 53
3.1 Introduction . . . 53
3.2 Rôle de l'onduleur dans un système photovoltaïque . . . 54
3.3 Classification des onduleurs pour systèmes photovoltaïques . . . 54
3.3.1 Classification selon l'architecture du système . . . 55
3.3.2 Classification selon le type de commutation . . . 58
3.3.3 Classification selon les composants de commutation . . . 59
3.4 Caractéristiques techniques attendues d'un onduleur photovoltaïque . . . 62
3.5 Importance du choix technologique . . . 63
3.6 Exemples de topologies d'onduleurs . . . 64
3.6.1 Onduleur à pont complet (H-Bridge) . . . 64
3.6.2 Onduleur multiniveaux . . . 65
3.6.3 Onduleur intelligent hybride . . . 67
3.6.4 Micro-onduleur . . . 69
3.7 Comparaison et critères de choix . . . 69

3.8 Proposition d'un type d'onduleur adapté 70
3.8.1 Contexte du choix 70
3.8.2 Caractéristiques générales du SUN2000-5KTL-L1 70
3.8.3 Spécifications techniques principales 71
3.8.4 Raisons du choix 71
3.8.5 Architecture de conversion 72
3.8.6 Technologies utilisées 72
3.8.7 Avantages technologiques 72
3.9 Conclusion 73

4 Chapitre 4 : Simulation sous MATLAB/Simulink 74
4.1 Introduction 74
4.2 Architecture du circuit simulé 74
4.2.1 Description des composants 75
4.2.2 Justification du modèle 76
4.3 Paramètres de simulation 76
4.4 Analyse des signaux simulés 77
4.5 Interprétation des résultats 80
4.6 Conclusion 81

Conclusion générale 83

Bibliographie 85

Liste des figures

1.1 Spectres du rayonnement solaire moyen incident au sommet de l'atmosphère (courbe jaune) et à la surface de la terre (jaune). La fraction du rayonnement absorbée au niveau de la mer en rouge, celle qui est rétrodiffusée en violet [23]. 4
1.2 Coupe transversale d'un module photovoltaïque montrant la structure interne. 23
1.3 Panneaux photovoltaïques exposés au soleil. 25
1.4 Schéma de principe d'un système photovoltaïque avec batterie. 26
1.5 Schéma de fonctionnement d'une batterie de stockage solaire. 27

2.1 Schéma de principe de l'onduleur. 34
2.2 Schéma d'instalation onduleur photovoltaïque. 35
2.3 Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé en demi-pont. 36
2.4 Schéma de puissance de l'onduleur monophasé en pont. 37
2.5 Structure d'un onduleur triphasée. 38
2.6 Schéma Transistors bipolaires à grille isolée (IGBT) 42
2.7 Schéma comparatif IGBT vs MOSFET. 43
2.8 Courbe de rendement d'un onduleur. 46
2.9 Schéma fonctionnel général du système photovoltaïque avec MPPT. 50

3.1 Schema onduleur chaine(string). 56
3.2 Schema instalation photovoltaique micro onduleur. 57
3.3 Schéma onduleur hybride. 58
3.4 Schéma onduleur triphasé a deux niveaux. 59
3.5 MOSFET. 60
3.6 Schéma IGBT. 60
3.7 Schéma différence entre MOSFET et IGBT. 61
3.8 Schéma onduleur pont complet (H-Bridge). 64
3.9 Schéma d'un onduleur NPC a cinq niveaux. 66

4.1 Schéma du circuit simulé sous Simulink. 77
4.2 Tension de sortie avant filtre LC. 78
4.3 Tension de sortie après filtre LC. 78
4.4 Courant dans la charge résistive avant filtre. 79
4.5 Analyse FFT du signal de sortie. 80

Liste des tableaux

3.1 Comparaison et critères de choix des types d'onduleurs 69
3.2 Caractéristiques techniques de l'onduleur Huawei SUN2000-5KTL-L1 . . . 71

Introduction générale

Dans un contexte mondial marqué par la transition énergétique, l'énergie solaire photovoltaïque représente une solution durable et propre face aux limites des ressources fossiles. Ce mémoire s'inscrit dans cette dynamique et traite de l'étude et de la mise en œuvre des convertisseurs pour systèmes photovoltaïques, en particulier les onduleurs, composants essentiels pour rendre l'énergie solaire exploitable.

Le travail s'articule autour de quatre chapitres principaux.

Le Chapitre 1 présente les fondements de l'énergie solaire et des systèmes photovoltaïques. Il introduit les principaux composants, le fonctionnement des cellules solaires, les avantages et les contraintes liés à cette technologie, ainsi que son rôle croissant dans le mix énergétique mondial.

Le Chapitre 2 est consacré à l'étude des onduleurs DC/AC. Ce chapitre aborde les principes de conversion de l'énergie, les différentes topologies existantes (pont complet, demi-pont, multiniveaux, etc.), les composants électroniques de puissance utilisés (MOSFET, IGBT, SiC, GaN), ainsi que les techniques de modulation (SPWM, SVPWM, etc.) qui permettent de garantir un signal de sortie de qualité.

Le troisième chapitre étudie l'intégration des onduleurs dans les systèmes photovoltaïques, avec une comparaison des topologies existantes. Il se conclut par la proposition de l'onduleur Huawei SUN2000-5KTL-L1, adapté aux installations résidentielles pour ses hautes performances et sa compatibilité réseau.

Le Chapitre 4 est dédié à la modélisation et à la simulation de l'onduleur proposé. À l'aide de MATLAB/Simulink, une simulation numérique est réalisée afin d'évaluer la conversion DC/AC, le comportement dynamique du système, le respect des normes de qualité de l'onde (THD), et les performances globales en termes de rendement et de stabilité. Cette étape permet de valider la pertinence du choix technologique sur des critères techniques et fonctionnels.

CHAPITRE 1

Système Photovoltaïque

1.1 Introduction

L'essor des énergies renouvelables constitue une réponse stratégique aux défis énergétiques et environnementaux actuels. Parmi elles, l'énergie solaire occupe une place prépondérante en raison de son fort potentiel, notamment dans les régions ensoleillées. La technologie photovoltaïque permet de convertir directement l'énergie solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Ce procédé, à la fois propre et silencieux, s'intègre dans des systèmes complets qui comprennent plusieurs composants essentiels, tels que les panneaux solaires, les onduleurs, les dispositifs de protection et, dans certains cas, des moyens de stockage. Ce chapitre a pour objectif de présenter les bases de l'énergie solaire et les éléments constitutifs d'un système photovoltaïque, dans le but de mieux comprendre le rôle fondamental que joue l'onduleur dans ce contexte.

1.2 Les Caractéristiques de l'Énergie Solaire

1.2.1 Le Rayonnement Solaire

Le rayonnement électromagnétique est composé de « grains » de lumière appelés photons.
L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ par la relation suivante :

$$E_p = \frac{h \cdot c}{\lambda} \tag{I.1}$$

avec :

$$h = 6{,}62 \times 10^{-34}\ \mathrm{J \cdot s^{-1}}$$

$$c = 3 \times 10^{8}\ \mathrm{m/s}$$

C'est une propagation d'une onde de longueur qui varie entre 0.2 et 4.10-6m d'après : Etude et simulation d'un Générateur photovoltaïque Muni d'un convertisseur MPPT pour une meilleur gestion énergétique [27].

Sans avoir besoin d'un support physique pour se développer, elle accède au sol après la destruction d'une très grande quantité de son énergie, à travers une zone d'ultraviolets qui est absorbée. L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

♣ 9% dans la bande des ultraviolets (0.8 m).

♣ 47% dans la bande visible (0.4 à 0.8 m).

♣ 44% dans la bande des infrarouges (>0.8 m).

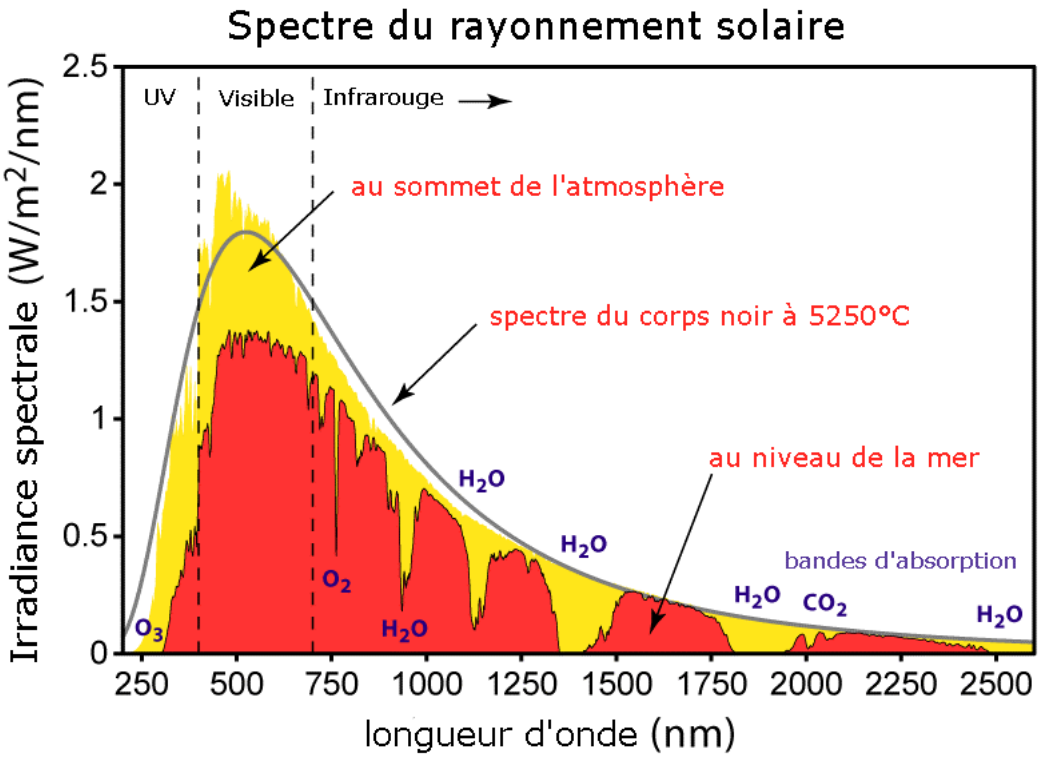

FIGURE 1.1 – *Spectres du rayonnement solaire moyen incident au sommet de l'atmosphère (courbe jaune) et à la surface de la terre (jaune). La fraction du rayonnement absorbée au niveau de la mer en rouge, celle qui est rétrodiffusée en violet [23].*

1.2.1.1 Les types de rayonnement solaire

Il y a quatre types de rayonnements :

A- Rayonnement direct :

Le rayonnement direct est le rayonnement solaire qui atteint la surface de la terre directement à partir du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Pyrhéliomètre est un appareil qui mesure la densité du rayonnement direct. Le pyrhéliomètre doit être équipés d'un appareil permettant de le diriger en continu vers le soleil.

B- Rayonnement diffus :

Elle est constituée de lumière diffusée par l'atmosphère (air, couverture nuageuse, aérosols). La dispersion est le phénomène de division des rayons parallèles en un certain nombre de rayons allez dans une direction différente. Il peut être mesuré par un pyranomètre avec un

écran qui bloque le soleil.

C- Rayonnement solaire réfléchi :

Cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige). Il se caractérise par un coefficient propre de la nature du lien appelé Albédo 0.

D- Rayonnement global :

Le rayonnement global est la somme de tous les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un pyranomètre ou un solarimètre sans écran. Les stations météorologiques généralement mesurent le rayonnement global horizontal par un pyranomètre placé horizontalement à l'endroit requis [27].

1.2.2 Facteurs influençant l'ensoleillement

L'ensoleillement correspond à la quantité de rayonnement solaire atteignant la surface terrestre. Sa variation dépend de plusieurs paramètres, notamment la position géographique, les conditions atmosphériques et les caractéristiques locales du site. Une bonne compréhension de ces facteurs est essentielle pour optimiser l'efficacité des systèmes exploitant l'énergie solaire.

1.2.2.1 Latitude et position géographique

La latitude influence directement la quantité d'énergie solaire reçue par une région donnée. À l'équateur, le rayonnement solaire est presque constant tout au long de l'année, ce qui favorise une production stable d'énergie. Dans les zones tempérées, l'ensoleillement varie selon les saisons, avec des journées plus courtes en hiver et plus longues en été. Aux latitudes élevées, cette variabilité est encore plus marquée, entraînant des périodes de forte exposition en été (phénomène du soleil de minuit) et d'obscurité prolongée en hiver (nuit polaire).

1.2.2.2 Angle d'incidence du rayonnement solaire

L'angle d'incidence du rayonnement solaire sur une surface influence directement l'intensité de l'énergie reçue. Lorsque le Soleil est haut dans le ciel, les rayons solaires frappent la surface terrestre presque perpendiculairement, maximisant ainsi l'ensoleillement. En revanche, lorsque le Soleil est proche de l'horizon, l'énergie reçue est répartie sur une surface plus grande, ce qui réduit son intensité. Dans le domaine photovoltaïque, il est essentiel d'optimiser cet angle en fonction de la latitude pour maximiser l'efficacité des capteurs solaires.

1.2.2.3 Influence des saisons

Les variations saisonnières de l'ensoleillement résultent de l'inclinaison de l'axe terrestre de 23,5° par rapport au plan de son orbite autour du Soleil. Pendant l'été, l'inclinaison favorise une plus grande exposition au Soleil et une durée de jour plus longue, ce qui augmente la production d'énergie solaire. À l'inverse, en hiver, le Soleil est plus bas sur l'horizon et les journées sont plus courtes, réduisant ainsi l'ensoleillement disponible. Cette variation annuelle est particulièrement marquée aux latitudes moyennes et élevées.

1.2.2.4 Influence de l'altitude et de la topographie

L'altitude joue un rôle important dans l'intensité du rayonnement solaire. Plus l'altitude est élevée, plus l'atmosphère est fine, ce qui réduit l'absorption et la diffusion du rayonnement solaire. Ainsi, les régions montagneuses bénéficient généralement d'un ensoleillement plus intense que les plaines. En revanche, la présence de reliefs, comme des montagnes ou des collines, peut créer des zones d'ombre qui limitent l'exposition au Soleil, en particulier aux premières heures du matin et en fin d'après-midi.

1.2.2.5 Conditions météorologiques et couverture nuageuse

Les conditions atmosphériques influencent considérablement l'ensoleillement. Un ciel dégagé permet un rayonnement maximal, tandis qu'une couverture nuageuse épaisse réduit significativement la quantité d'énergie solaire atteignant le sol. Le brouillard, l'humidité et la

pollution atmosphérique peuvent également diffuser et absorber une partie du rayonnement, affectant ainsi le rendement des systèmes solaires. Dans certaines conditions, un léger voile nuageux peut améliorer le rendement des panneaux photovoltaïques en diffusant la lumière et en réduisant les pertes dues aux ombrages directionnels.

1.2.2.6 Effet de la réflexion et de l'albédo

L'albédo désigne la capacité d'une surface à réfléchir le rayonnement solaire. Les surfaces claires, comme la neige ou le sable, réfléchissent une proportion importante du rayonnement, augmentant ainsi l'ensoleillement effectif reçu par les capteurs solaires. À l'inverse, les surfaces sombres, comme l'eau ou les forêts denses, absorbent davantage l'énergie solaire et réfléchissent moins de lumière. L'exploitation de l'albédo est particulièrement utile dans les régions enneigées, où la réflexion de la lumière sur le sol peut augmenter la production énergétique des panneaux photovoltaïques.

1.2.2.7 Impact du changement climatique

Le changement climatique peut altérer les schémas d'ensoleillement à long terme. L'évolution de la couverture nuageuse, l'augmentation des particules en suspension dans l'atmosphère et les modifications des régimes météorologiques peuvent influencer la quantité d'énergie solaire atteignant la surface terrestre. Certaines régions pourraient connaître une hausse de l'ensoleillement en raison de la réduction des aérosols polluants, tandis que d'autres pourraient être affectées par une augmentation des tempêtes de sable ou une intensification des épisodes nuageux. Par ailleurs, l'élévation des températures impacte légèrement l'efficacité des cellules photovoltaïques, celles-ci ayant tendance à voir leur rendement diminuer avec la chaleur excessive[7].

1.3 Les Différentes Formes d'Utilisation de l'Énergie Solaire

L'énergie solaire constitue une ressource renouvelable et inépuisable, offrant une alternative durable aux combustibles fossiles. Son exploitation repose sur différentes technologies permettant de convertir le rayonnement solaire en énergie utilisable. Les principales formes

d'utilisation de l'énergie solaire incluent la conversion thermique, la conversion photovoltaïque et la conversion chimique.

1.3.1 L'énergie solaire thermique

L'énergie solaire thermique repose sur l'absorption du rayonnement solaire pour produire de la chaleur. Cette technologie se décline en plusieurs applications selon la température de fonctionnement et les besoins énergétiques spécifiques.

1.3.1.1 Le chauffage solaire passif

Le chauffage solaire passif consiste à exploiter directement l'énergie du Soleil sans recours à des dispositifs mécaniques ou électriques. L'architecture bioclimatique illustre cette approche, en utilisant des matériaux à forte inertie thermique et des vitrages adaptés pour capter et stocker la chaleur solaire. L'orientation des bâtiments et l'isolation thermique jouent un rôle clé dans l'efficacité de cette technique.

1.3.1.2 Le chauffage solaire actif

Contrairement au chauffage passif, le chauffage solaire actif repose sur des capteurs thermiques qui absorbent le rayonnement solaire et le transfèrent sous forme de chaleur à un fluide caloporteur. Cette chaleur est ensuite utilisée pour chauffer des espaces intérieurs ou pour la production d'eau chaude sanitaire. Parmi les capteurs thermiques les plus courants, on distingue les capteurs plans vitrés, les capteurs à tubes sous vide et les capteurs non vitrés, chacun présentant des performances adaptées aux conditions climatiques et aux besoins spécifiques.

1.3.1.3 La production d'électricité par concentration solaire

L'énergie solaire thermique peut également être exploitée pour produire de l'électricité grâce aux centrales solaires thermodynamiques. Ces installations utilisent des miroirs pour concentrer le rayonnement solaire sur un fluide caloporteur, souvent un sel fondu ou de

l'huile synthétique, atteignant des températures élevées. Cette chaleur est ensuite transformée en énergie mécanique et convertie en électricité via une turbine et un alternateur. Parmi les technologies utilisées, on retrouve les centrales à tour solaire, les centrales à collecteurs cylindro-paraboliques et les centrales à disque de Stirling.

1.3.2 L'énergie solaire photovoltaïque

La conversion photovoltaïque repose sur le principe de l'effet photoélectrique, découvert par Albert Einstein en 1905. Cette technologie permet de transformer directement l'énergie lumineuse en électricité grâce à des cellules photovoltaïques constituées de matériaux semi-conducteurs, généralement du silicium.

1.3.2.1 Les cellules photovoltaïques et leur fonctionnement

Les cellules photovoltaïques fonctionnent en libérant des électrons sous l'effet du rayonnement solaire, créant ainsi un courant électrique. Elles sont regroupées en modules ou panneaux photovoltaïques pour augmenter la puissance de production. Les technologies actuelles comprennent principalement les cellules en silicium cristallin (monocristallin et polycristallin), les cellules à couches minces et les cellules à base de pérovskites, ces dernières étant en plein essor grâce à leur rendement élevé et leur coût réduit.

1.3.2.2 Les systèmes photovoltaïques autonomes et connectés

Les installations photovoltaïques peuvent être autonomes ou connectées au réseau électrique. Les systèmes autonomes stockent l'énergie produite dans des batteries pour une utilisation différée, ce qui les rend particulièrement adaptés aux zones isolées dépourvues de connexion au réseau. À l'inverse, les systèmes connectés injectent l'électricité directement dans le réseau, permettant ainsi une meilleure intégration de l'énergie solaire dans le mix énergétique.

1.3.2.3 Les avancées technologiques et perspectives du photovoltaïque

Le domaine photovoltaïque connaît des avancées significatives visant à améliorer le rendement des cellules et à réduire les coûts de production. L'émergence des panneaux bifaciaux, capables de capter la lumière des deux côtés, ainsi que l'intégration des cellules solaires dans les matériaux de construction (BIPV : Building Integrated Photovoltaics), ouvrent de nouvelles perspectives pour une adoption plus large de cette technologie.

1.3.3 L'énergie solaire chimique

En plus de ses applications thermiques et photovoltaïques, l'énergie solaire peut être exploitée pour produire des carburants propres par conversion chimique.

1.3.3.1 La photosynthèse artificielle

La photosynthèse artificielle vise à imiter le processus naturel de conversion de l'énergie solaire en énergie chimique. Cette technologie repose sur l'utilisation de catalyseurs capables de scinder les molécules d'eau en hydrogène et en oxygène sous l'effet du rayonnement solaire. L'hydrogène produit peut ensuite être utilisé comme carburant propre, contribuant à la transition énergétique vers une économie bas carbone.

1.3.3.2 La production de combustibles solaires

L'énergie solaire peut également être utilisée pour convertir le dioxyde de carbone en hydrocarbures synthétiques grâce à des procédés thermochimiques. Ces combustibles solaires offrent une alternative aux énergies fossiles en exploitant directement l'énergie du Soleil pour générer des carburants neutres en carbone[22].

1.4 Avantages et Inconvénients de l'Énergie Solaire

L'énergie solaire est considérée comme l'une des principales solutions pour répondre aux défis énergétiques actuels, notamment la transition vers des sources d'énergie durables et la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Cependant, malgré ses nombreux atouts,

cette énergie présente également certaines limites qui freinent son déploiement à grande échelle.

1.4.1 Les avantages de l'énergie solaire

1.4.1.1 Une source d'énergie renouvelable et inépuisable

Le principal atout de l'énergie solaire réside dans son caractère inépuisable. Contrairement aux combustibles fossiles, qui s'épuisent progressivement, le Soleil représente une source d'énergie stable et continue. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie (IEA), la Terre reçoit chaque année environ 173 000 térawatts d'énergie solaire, soit près de 10 000 fois la consommation énergétique mondiale actuelle [4].

1.4.1.2 Une énergie propre et respectueuse de l'environnement

L'exploitation de l'énergie solaire ne génère aucune émission de dioxyde de carbone (CO_2) ou d'autres polluants atmosphériques lors de son fonctionnement. Contrairement aux centrales thermiques fonctionnant au charbon ou au gaz, les installations solaires ne produisent ni gaz à effet de serre, ni déchets toxiques. Elles contribuent ainsi à la lutte contre le réchauffement climatique et à l'amélioration de la qualité de l'air [10].

1.4.1.3 Une indépendance énergétique accrue

Le développement de l'énergie solaire permet de réduire la dépendance aux importations d'énergies fossiles, ce qui améliore la sécurité énergétique des pays. Les systèmes photovoltaïques, notamment lorsqu'ils sont couplés à des batteries de stockage, permettent aux foyers et aux entreprises de produire leur propre électricité, limitant ainsi leur vulnérabilité aux fluctuations des prix de l'énergie.

1.4.1.4 Une grande flexibilité d'installation

Les technologies solaires s'adaptent à une grande diversité de contextes et d'usages. Les panneaux photovoltaïques peuvent être installés sur les toits des bâtiments, intégrés aux infrastructures urbaines (Building Integrated Photovoltaics – BIPV), déployés sous forme de

fermes solaires ou encore utilisés pour des applications isolées (électrification rurale, satellites, véhicules solaires). Cette polyvalence constitue un atout majeur pour le développement de l'énergie solaire dans le monde [22].

1.4.1.5 Des coûts en baisse et une rentabilité croissante

Grâce aux avancées technologiques et à la production industrielle de masse, le coût des panneaux photovoltaïques a fortement diminué au cours des dernières décennies. Selon l'IEA (2021), le prix du solaire photovoltaïque a chuté de près de 90 % depuis 2010, rendant cette technologie compétitive par rapport aux énergies fossiles. Par ailleurs, les coûts de maintenance des installations solaires sont relativement faibles, ce qui améliore leur rentabilité sur le long terme[15].

1.4.2 Les inconvénients de l'énergie solaire

1.4.2.1 Une production intermittente et dépendante des conditions météorologiques

L'un des principaux défis de l'énergie solaire réside dans son intermittence. La production d'électricité dépend directement de l'ensoleillement, ce qui signifie qu'elle varie selon l'heure de la journée, la saison et les conditions météorologiques. La nuit et par temps couvert, la production d'énergie est considérablement réduite, nécessitant l'usage de systèmes de stockage ou de sources d'appoint.

1.4.2.2 Un rendement énergétique limité

Le rendement des cellules photovoltaïques demeure relativement faible, bien qu'il ait progressé avec les avancées technologiques. Les panneaux solaires classiques en silicium cristallin affichent un rendement moyen de 15 à 22%, tandis que les cellules de nouvelle génération, comme les cellules à pérovskites, peuvent atteindre des rendements supérieurs à 30% en laboratoire [10]. Toutefois, ces performances restent inférieures à celles des sources d'énergie conventionnelles, telles que les centrales thermiques ou hydroélectriques.

1.4.2.3 Un coût initial élevé et un retour sur investissement long

Bien que les prix des panneaux photovoltaïques aient chuté, l'investissement initial pour une installation solaire demeure relativement élevé. L'achat et l'installation des panneaux, ainsi que le coût éventuel du stockage par batteries, représentent un frein pour de nombreux ménages et entreprises. Le retour sur investissement varie en fonction des incitations gouvernementales (subventions, crédits d'impôt) et du coût local de l'électricité [4].

1.4.2.4 L'impact environnemental de la fabrication et du recyclage

La production des panneaux solaires nécessite l'extraction et le traitement de matériaux tels que le silicium, l'argent et le tellurure de cadmium, dont l'exploitation peut avoir un impact environnemental. De plus, la fabrication des cellules photovoltaïques entraîne une consommation énergétique et l'utilisation de produits chimiques potentiellement polluants [28].
Le recyclage des panneaux en fin de vie représente également un défi. Bien que des filières de recyclage se développent progressivement, la gestion des déchets issus des installations solaires reste une problématique à long terme, notamment avec l'augmentation rapide du nombre de panneaux en service.

1.4.2.5 L'occupation de l'espace et l'impact sur l'environnement

Les grandes centrales solaires nécessitent d'importantes surfaces, ce qui peut poser des problèmes d'occupation des sols et d'impact sur la biodiversité. Certaines installations, notamment les fermes solaires en milieu naturel, peuvent perturber les écosystèmes locaux en modifiant l'habitat de certaines espèces. Cependant, des solutions existent, comme l'agrivoltaïsme, qui combine production agricole et production d'énergie solaire sur un même terrain [22].

1.4.3 Bilan et perspectives

Malgré ses limites, l'énergie solaire s'impose comme une alternative incontournable pour un avenir énergétique durable. Les progrès technologiques, notamment dans le domaine

du stockage de l'énergie et des matériaux photovoltaïques, devraient permettre d'améliorer le rendement et la rentabilité des installations solaires. L'essor des réseaux intelligents (smart grids) et des solutions hybrides associant solaire et stockage devrait également renforcer l'intégration de cette énergie dans le mix énergétique mondial.
Si des défis restent à relever, les avantages de l'énergie solaire surpassent progressivement ses inconvénients, justifiant son adoption croissante à travers le monde.

1.5 Applications et Perspectives

L'énergie solaire connaît un essor considérable grâce aux progrès technologiques et à la prise de conscience des enjeux environnementaux. Ses applications sont multiples et touchent divers secteurs, de la production d'électricité à l'industrie, en passant par le transport et l'agriculture. Cependant, son développement futur dépendra de l'amélioration des technologies, de la gestion du stockage de l'énergie et des politiques de soutien mises en place.

1.5.1 Applications de l'énergie solaire

1.5.1.1 Production d'électricité solaire

L'application la plus répandue de l'énergie solaire est la production d'électricité via les panneaux photovoltaïques et les centrales solaires thermodynamiques.

- **Photovoltaïque résidentiel et industriel** : Les panneaux solaires sont utilisés pour alimenter les foyers, les entreprises et les infrastructures publiques. Ils permettent de réduire la facture énergétique et, dans certains cas, de revendre l'électricité excédentaire au réseau.
- **Centrales solaires à grande échelle** : Des fermes solaires sont déployées pour produire de l'électricité à grande échelle, notamment dans les régions à fort ensoleillement comme l'Afrique du Nord, le Moyen-Orient et le sud de l'Europe. Ces installations sont essentielles pour diversifier le mix énergétique et réduire la dépendance aux énergies fossiles.

- **Microgrids et électrification rurale** : Dans les régions isolées, l'énergie solaire permet de créer des réseaux électriques décentralisés (microgrids), offrant ainsi une solution durable pour l'électrification des zones non connectées aux réseaux traditionnels [25].

1.5.1.2 Chauffage et climatisation solaire

L'énergie solaire est également exploitée pour le chauffage et la climatisation des bâtiments.

- **Chauffage solaire de l'eau** : Les chauffe-eau solaires utilisent des capteurs thermiques pour chauffer un fluide caloporteur, qui transfère ensuite la chaleur à l'eau sanitaire. Cette technologie est largement utilisée dans les habitations et les hôtels.
- **Climatisation solaire** : Grâce à des systèmes de refroidissement par absorption ou adsorption, la chaleur solaire peut être convertie en froid pour la climatisation des bâtiments, réduisant ainsi la consommation d'électricité des climatiseurs traditionnels [10].

1.5.1.3 Transport et mobilité solaire

L'énergie solaire commence à être intégrée dans le secteur des transports pour réduire la consommation de carburants fossiles.

- **Véhicules solaires** : Certains véhicules électriques sont équipés de panneaux photovoltaïques pour prolonger leur autonomie. Bien que cette technologie en soit encore à ses débuts, elle pourrait révolutionner le transport individuel.
- **Bateaux et avions solaires** : Des prototypes comme Solar Impulse (avion solaire) ou PlanetSolar (bateau solaire) ont démontré la faisabilité du transport solaire. Ces innovations ouvrent la voie à des moyens de transport plus durables à long terme [15].

1.5.1.4 Agriculture et dessalement de l'eau

L'énergie solaire joue un rôle clé dans l'amélioration de la productivité agricole et la gestion des ressources en eau.

- **Agrivoltaïsme** : Cette approche consiste à associer production agricole et panneaux solaires sur une même surface, permettant une meilleure gestion de l'eau et une protection des cultures contre les conditions climatiques extrêmes.
- **Irrigation solaire** : Les pompes solaires permettent d'irriguer les cultures sans recourir aux énergies fossiles, réduisant ainsi les coûts pour les agriculteurs.
- **Dessalement solaire de l'eau de mer** : L'énergie solaire est utilisée pour alimenter des usines de dessalement, offrant une solution durable pour les régions souffrant de stress hydrique, notamment au Moyen-Orient et en Afrique du Nord [22].

1.5.1.5 Éclairage public et équipements urbains

De nombreuses villes adoptent des solutions solaires pour améliorer leur efficacité énergétique et réduire leur empreinte carbone.

- **Lampadaires solaires** : Utilisés dans de nombreuses municipalités, ils permettent un éclairage public autonome, sans connexion au réseau électrique.
- **Mobilier urbain solaire** : Des bancs, abribus et bornes de recharge alimentés par l'énergie solaire offrent des services modernes tout en réduisant la consommation d'électricité.

1.5.2 Perspectives de développement de l'énergie solaire

1.5.2.1 Amélioration des rendements photovoltaïques

Les recherches actuelles visent à améliorer l'efficacité des panneaux solaires. Les cellules photovoltaïques de nouvelle génération, comme les cellules tandem silicium-pérovskite, atteignent des rendements supérieurs à 30 %, contre 15 à 22 % pour les panneaux classiques [10].

1.5.2.2 Avancées dans le stockage de l'énergie

L'un des principaux défis du solaire est son intermittence. Des solutions comme les batteries lithium-ion et les batteries à flux redox permettent de stocker l'énergie solaire pour

une utilisation nocturne ou par temps nuageux. Le développement de nouvelles technologies, comme les batteries solides et les solutions de stockage thermique, pourrait améliorer encore davantage l'intégration du solaire dans les réseaux électriques [4].

1.5.2.3 Intégration aux infrastructures et bâtiments intelligents

Le développement des Building Integrated Photovoltaics (BIPV) permet d'intégrer directement les cellules solaires dans les façades, fenêtres et toitures des bâtiments, réduisant ainsi leur empreinte carbone tout en produisant de l'énergie. De plus, les réseaux intelligents (smart grids) optimisent la distribution de l'énergie solaire en fonction de la demande [25].

1.5.2.4 Politique énergétique et soutien gouvernemental

Les politiques publiques jouent un rôle crucial dans l'adoption de l'énergie solaire. De nombreux pays ont mis en place des incitations financières, telles que des crédits d'impôt, des subventions et des tarifs de rachat garantis (feed-in tariffs), pour encourager l'installation de panneaux solaires. La transition énergétique mondiale dépendra en grande partie du maintien de ces politiques et du développement de nouvelles infrastructures adaptées [15].

1.5.2.5 Rôle de l'énergie solaire dans la transition énergétique mondiale

L'énergie solaire est appelée à jouer un rôle central dans le futur mix énergétique mondial. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie, le solaire pourrait devenir la principale source d'électricité d'ici 2050, surpassant le charbon et le gaz naturel [15]. Sa flexibilité, sa compétitivité croissante et son impact environnemental réduit en font une solution incontournable pour répondre aux défis énergétiques et climatiques du XXIe siècle.

1.6 Système Photovoltaïque

Un système photovoltaïque est un dispositif permettant la conversion directe de l'énergie solaire en électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Il est composé de modules photovoltaïques, d'un régulateur de charge, d'un onduleur (pour convertir le courant continu en

courant alternatif) et, dans certains cas, de batteries pour le stockage d'énergie. Ces systèmes peuvent être autonomes, connectés au réseau, ou hybrides, selon leur mode d'intégration et leur usage.

Le principe de fonctionnement repose sur l'effet photovoltaïque, découvert par Edmond Becquerel en 1839. Lorsque les cellules photovoltaïques, constituées de semi-conducteurs comme le silicium, sont exposées à la lumière solaire, les photons libèrent des électrons, générant ainsi un courant électrique continu. Ce courant est ensuite transformé en courant alternatif par un onduleur afin d'alimenter des équipements électriques ou d'être injecté dans un réseau.

Les systèmes photovoltaïques sont aujourd'hui largement adoptés pour la production d'énergie propre et renouvelable, contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à l'indépendance énergétique. Face à la crise énergétique et aux enjeux environnementaux, le développement des systèmes photovoltaïques est devenu une priorité. La dépendance aux énergies fossiles et leurs impacts négatifs, comme le réchauffement climatique, ont accéléré la transition vers des sources d'énergie renouvelables. Les avancées technologiques ont permis d'améliorer le rendement des cellules solaires et de réduire les coûts, rendant le photovoltaïque plus compétitif. Son développement présente plusieurs avantages : réduction des émissions de CO_2, indépendance énergétique, accès à l'électricité dans les zones isolées, et baisse des coûts à long terme. Il constitue ainsi une solution clé pour un avenir énergétique durable. Ce chapitre vise à expliquer le fonctionnement des systèmes photovoltaïques, leurs composants et leur importance. Il présente les types de systèmes (autonomes, connectés au réseau, hybrides), ainsi que les critères de dimensionnement et d'optimisation. Enfin, il met en avant leurs applications et les défis liés à leur développement.

1.7 Principe de fonctionnement du système photovoltaïque

1.7.1 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique permettant la conversion directe de la lumière en électricité. Découvert par Alexandre-Edmond Becquerel en 1839, il est à la base

du fonctionnement des cellules photovoltaïques.
Lorsqu'un matériau semi-conducteur, comme le silicium, est exposé à la lumière, les photons transfèrent leur énergie aux électrons du matériau, les libérant de leur position initiale. Ce phénomène crée des paires électron-trou, qui, sous l'effet d'un champ électrique interne généré par une jonction PN, produisent un courant électrique continu exploitable.
Ce processus constitue le principe fondamental des systèmes photovoltaïques, permettant une production d'électricité propre et renouvelable.

1.7.2 Conversion de l'énergie solaire en électricité

La conversion de l'énergie solaire en électricité repose sur l'effet photovoltaïque, qui permet aux cellules solaires de transformer la lumière du soleil en courant électrique. Cette conversion suit plusieurs étapes physiques et peut être quantifiée par des formules mathématiques.

1.7.2.1 Puissance de l'Énergie Solaire Reçue

La puissance reçue par une surface exposée au soleil dépend de l'irradiance solaire (GGG), exprimée en watts par mètre carré (W/m²). La puissance totale reçue sur une surface AAA est donnée par :

$$P_{\text{soleil}} = G \times A$$

- P_{soleil} est la puissance solaire incidente (W),
- G est l'irradiance solaire (W/m²), généralement autour de 1000 W/m² en conditions standard,
- A est l'aire du panneau solaire (m²).

Exemple de calcul :
Pour un panneau solaire de 1.5 m², la puissance solaire reçue est :

$$P_{\text{soleil}} = 1000 \times 1.5 = 1500\,W$$

Les panneaux solaires n'ont pas un rendement de 100 %. Le rendement photovoltaïque

(η) dépend du type de cellule utilisée (silicium monocristallin, polycristallin, etc.). Il est défini par :

$$P_{\text{electrique}} = \eta \times P_{\text{soleil}}$$

- $P_{\text{electrique}}$ est la puissance électrique produite (W),
- η est le rendement du panneau (en général 15 % à 22 %).

Exemple de calcul :

Si le panneau a un rendement de 20 % ($\eta = 0.2$) :

$$P_{\text{électrique}} = 0.2 \times 1500 = 300\,W$$

Le panneau produit donc 300 W d'électricité sous des conditions idéales.

1.7.2.2 Calcul du courant et de la tension

La relation entre la puissance électrique (P), la tension (V), et le courant (I) est donnée par la loi électrique fondamentale :

$$P = V \times I$$

Sachant qu'un panneau photovoltaïque classique produit environ 0.6 V par cellule, et qu'un panneau standard possède 60 cellules, la tension totale est :

$$V = 60 \times 0.6 = 36\,V$$

Le courant produit par le panneau est alors :

$$I = \frac{P_{\text{electrique}}}{V} = \frac{300}{36} \approx 8.33\,A$$

1.7.2.3 Énergie produite en fonction du temps

L'énergie totale produite en une journée est obtenue en multipliant la puissance par la durée d'ensoleillement :

$$E = P_{\text{electrique}} \times t$$

- E est l'énergie électrique produite (Wh ou kWh),
- t est le nombre d'heures d'ensoleillement effectif.

Exemple de calcul :

Si l'ensoleillement moyen est de 5 heures par jour, l'énergie produite est :

$$E = 300 \times 5 = 1500\,Wh = 1.5\,kWh$$

Cela signifie qu'un panneau de 1.5 m² avec un rendement de 20 % peut produire 1.5 kWh d'électricité par jour sous un ensoleillement optimal.

1.8 Caractéristiques électriques des modules photovoltaïques

Les modules photovoltaïques sont définis par plusieurs paramètres électriques essentiels [26] [20] :

- **Tension à vide (Voc)** : Tension maximale sans charge, environ 36V pour un module de 60 cellules.
- **Courant de court-circuit (Isc)** : Courant maximal sous irradiation standard (1000 W/m²).
- **Puissance maximale (Pmax)** : Correspond au point de puissance maximale (MPP) :

$$P_{\text{max}} = V_{\text{mp}} \times I_{\text{mp}}$$

- **Rendement** (η) : Proportion d'énergie solaire convertie en électricité :

$$\eta = \frac{P_{\text{max}} \times 100}{G \times A}$$

Exemple : un module de 320 W et 1.6 m² atteint 20 % sous 1000 W/m².

- **Facteur de remplissage (FF)** : Indicateur de performance :

$$FF = \frac{P_{\text{max}}}{V_{\text{oc}} \times I_{\text{sc}}}$$

Bon panneau : **FF > 0.75**.

- **Effet de la température** : La tension diminue d'environ 0.3 %/°C.

1.9 Facteurs influençant le rendement

Le rendement d'un module photovoltaïque dépend de plusieurs facteurs [24][16] :

- **Irradiance solaire** : Plus l'irradiance est élevée, plus la production d'énergie est importante. Cependant, une trop forte irradiation peut entraîner une surchauffe et réduire l'efficacité.
- **Température** : Une élévation de température diminue la tension du module $-0{,}3\,\%/^{\circ}\text{C}$, réduisant ainsi le rendement global.
- **Angle d'inclinaison et orientation** : Un angle optimal maximise l'absorption de la lumière solaire. En général, une inclinaison égale à la latitude du site est recommandée.
- **Qualité des cellules photovoltaïques** : Les cellules en silicium monocristallin offrent un rendement plus élevé (18-22%) que les cellules polycristallines (15-18%).
- **Poussière et salissures** : Une accumulation de poussière ou d'ombres partielles réduit la quantité de lumière reçue et diminue la production d'énergie.
- **Dégradation des modules** : Avec le temps, les panneaux subissent une perte de rendement d'environ 0.5 à 1 % par an.

1.10 Composants d'un système photovoltaïque

1.10.1 Modules et panneaux

Les modules sont obtenus en assemblant les cellules pour générer une puissance exploitable lors de l'exposition à la lumière puisqu'une cellule élémentaire ne génère qu'une tension allant de 0.5 à 1.5 Volt.
Il faut donc plusieurs cellules pour générer une tension utilisable Montage des cellules.
Pour obtenir une tension utilisable, il est indispensable de faire la mise en série des cellules (photopiles).
Lorsque les cellules sont en série, les tensions de toutes les cellules s'ajoutent alors que le courant lui, reste le même que celui d'une seule cellule. Il faut donc des cellules de même courant pour les mettre en série.
On réalise donc des modules de diverse puissance selon la surface mise en oeuvre, capable de générer du courant continu en basse tension lorsqu'ils sont exposés à la lumière. En conclusion le montage des cellules en série constitue le module.

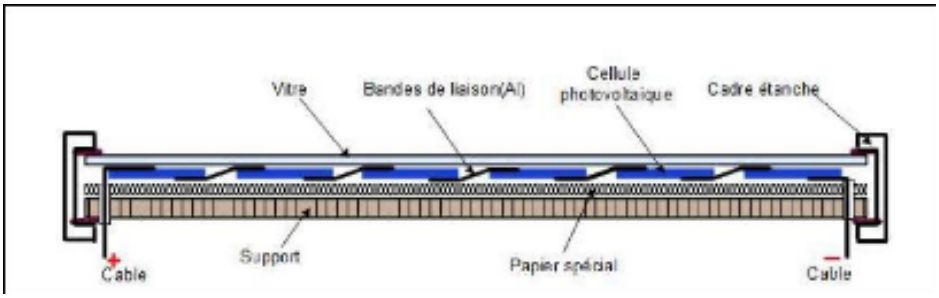

FIGURE 1.2 – *Coupe transversale d'un module photovoltaïque montrant la structure interne.*

1.10.1.1 Montage des modules

L'assemblage des modules forme un dispositif appelé «Panneau solaire »

Pour le montage des modules, la mise en série augmente la tension alors que le courant reste le même et la mise en parallèle, augmente le courant, mais la tension reste la même.

Pour faire la mise en série, il faut que les modules aient le même courant, mais pas nécessairement la même tension et pour la mise en parallèle, il faut que les blocs de modules aient la même tension, mais pas nécessairement le même courant.

1.10.1.2 Assemblage des panneaux

Pour disposer de plusieurs centaines de Watts, Kilo Watts et même méga Watts, il est nécessaire d'assembler les panneaux photovoltaïques pour l'obtention d'une grande tension. Le montage se fait en série pour un même courant et inversement pour l'obtention d'un grand courant.
On ne monte en série que les panneaux ayant un même courant et en parallèle, ceux ayant une même tension.
Mais en réalité, on n'a toujours pas des panneaux identiques, ce qui fait qu'il faut les appairer en tension ou en courant selon le cas.

Lorsqu'il y a une partie de la surface du panneau ou même un panneau qui n'est pas éclairé suite à une ombre ou un corps étranger porté sur une partie du champ photovoltaïque, le panneau peu exposé au rayonnement ne produira pas la même énergie que les autres et deviendra dans ce cas récepteurs des autres panneaux et recevra de la puissance en inverse d'où il y a risque de court-circuit et de destruction du système.
De ce fait, il faut placer une diode anti retour de puissance adéquate en sortie de chaque série de panneaux.

FIGURE 1.3 – *Panneaux photovoltaïques exposés au soleil.*

1.10.2 Régulateur de charge

Premièrement, le régulateur de charge est un système automatique dont la fonction principale est d'assurer le contrôle de l'état de charge de la batterie. Quand la batterie est chargée à 100%, il faut arrêter le courant de charge.

1.10.2.1 Régulateur de type shunt

C'est le modèle le plus répandu car il est simple à réaliser. Le courant des panneaux solaires est envoyé dans un interrupteur en parallèle avec la batterie lorsque celle-ci atteint sa pleine charge. Le principe de ce circuit est une simple bretelle ; tout le courant passe normalement dans la batterie et lorsque le seuil de coupure est atteint, tout le courant passe dans l'interrupteur. Il est donc nécessaire de rajouter une diode entre cet interrupteur et la batterie pour ne pas court-circuiter la batterie. Cette diode pourra servir de diode anti-retour. L'interrupteur utilisé est le plus souvent un MOSFET car il est plus intéressent qu'un transistor bipolaire puisqu'il dissipe moins d'énergie.

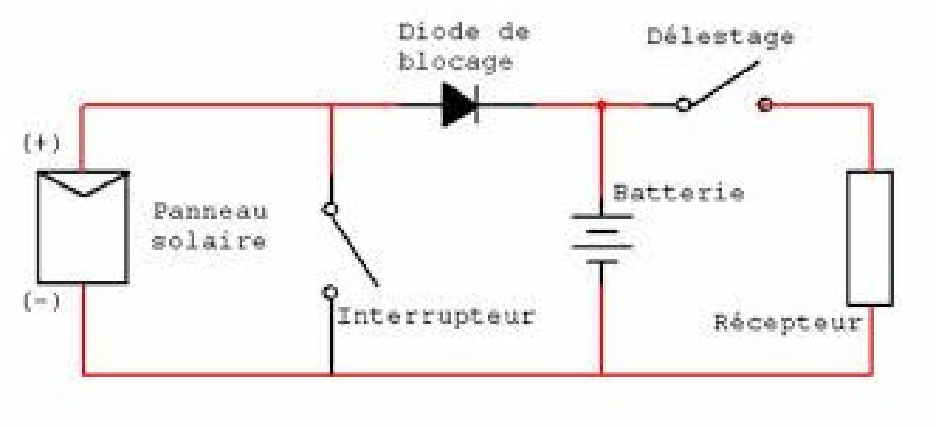

FIGURE 1.4 – *Schéma de principe d'un système photovoltaïque avec batterie.*

1.10.2.2 Régulateur de type série

Ce régulateur devient de plus en plus répandu et devrait à terme supplanter le régulateur shunt. Cette fois-ci, l'interrupteur de charge est en série avec la batterie et il s'ouvre lorsque la fin de la charge est atteinte. Les mêmes interrupteurs peuvent être utilisés que pour les shunts

1.10.2.3 Régulateur de type PWM

Le régulateur PWM gère de façon optimale les connexions et les déconnexions du module au reste du système. Selon l'état de charge de la batterie, il effectue des coupures plus ou moins longues et plus ou moins fréquents. Cette technologie permet de charger la batterie à 100% de leur capacité. Il devient le plus utilisé dans les installations photovoltaïques autonomes.

1.10.3 Batterie de stockage

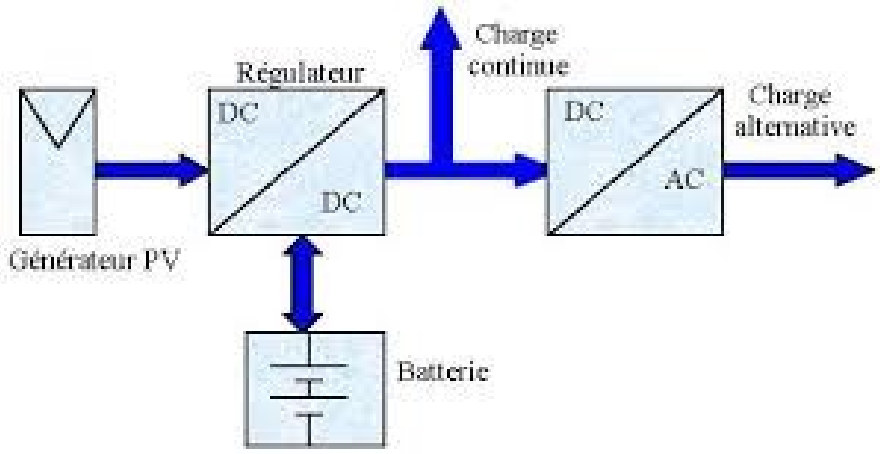

FIGURE 1.5 – *Schéma de fonctionnement d'une batterie de stockage solaire.*

1.10.3.1 Définition

Une batterie solaire est un appareil destiné à stocker l'énergie électrique produite par les panneaux solaires photovoltaïques. Le courant qui y entre ou qui en sort est forcément continu et non alternatif[29].

Les types des batteries : Il existe plusieurs types d'accumulateurs électrochimiques au Pb, Ni-Cd, Li-ion,.... Toutefois les plus anciens et les plus couramment utilisés sont ceux réalisés au plomb et au nickel cadmium. Dans le domaine solaire, les accumulateurs au plomb sont les plus utilisés, car ils peuvent résister à de nombreux cycles de charge et de décharge sans être endommagés[21].

1.10.3.2 Caractéristiques électriques

Caractéristiques électriques des batteries d'accumulateurs : Les caractéristiques des batteries font l'objet de beaucoup d'études et disposent d'une terminologie qu'il est important de définir afin d'éviter des confusions.

Capacité standard d'un accumulateur : le temps (en heures) pendant lequel l'accumulateur peut délivrer une certaine intensité de courant avant d'être déchargé [Ah].

Taux de charge/décharge : le rapport entre la capacité nominale de la batterie et le temps de

charge ou de décharge exprimé en heures [C/h].
Etat de charge : la quantité de charge qui peut être restituée par rapport à la capacité à pleine charge [%].
Cycle profond : dans le domaine solaire, on utilise des batteries dite à 'cycle profond' (en anglais 'deep-cycle', car elles peuvent être déchargées à plus de 50 % de la capacité nominale.
Tension de limite de décharge VLVD (Low Voltage LoadDisconnect) : il s'agit de la tension minimale Vmin , que la batterie ne devra pas aller en deçà, afin d'éviter que celle-ci ne soit endommagée.
Tension de régulation VR :
les constructeurs des batteries définissent une tension de régulation VR inférieure à la tension de gazéification. Cette tension est la valeur maximale que le régulateur permettra à la batterie d'atteindre à une température donnée. Elle peut être dépassée légèrement en fin de charge.

1.10.3.3 Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement des batteries de stockage il base sure le charge et décharge A -Pendant la charge Le sulfate de plomb $PbSO_4$ formé au niveau des deux électrodes se convertit au PbO_2 (électrode positive) et au Pb (électrode négative) et les ions sulfate retournent dans la solution pour former l'acide sulfurique. Pendant cette phase, la concentration de l'acide augmente et la tension de la batterie V_{bat} croît également avec le temps. En fin de charge, quand la tension de la batterie atteint la 'tension de gazéification', il y a lieu de limiter le courant de charge pour maintenir la tension de la batterie inférieure à la tension V_{R} (point 'M' (2.4 V/cell)) B-Pendant la décharge Quand la batterie se décharge, les matériaux actifs, le dioxyde de plomb au niveau de l'électrode positive et le plomb spongieux au niveau de l'électrode négative réagissent avec l'acide sulfurique pour former du sulfate de plomb $PbSO_4$ et de l'eau H_2O. Pendant cette phase, la concentration de l'acide décroît et la tension de la batterie V_{bat} décroît également avec le temps. Lorsque cette valeur décroît jusqu'à la valeur, VLVD (point 'N' (1,8V/cell)), (Fig. 1b-), du sulfate de plomb $PbSO_4$ se formera sur

les plaques. Ce phénomène aura comme conséquences la sulfatation de l'accumulateur qui entraîne une perte de capacité, et le vieillissement de la batterie[17].

1.10.4 Convertisseur

1.10.4.1 Définition

Les convertisseurs dans un système photovoltaïque sont des dispositifs électroniques de puissance chargés d'adapter, transformer et gérer l'énergie électrique produite par les panneaux solaires. Ils assurent la conversion de la tension et du courant (DC/DC ou DC/AC) pour rendre l'énergie compatible avec les exigences des charges, du stockage ou du réseau électrique.

1.10.4.2 Types de convertisseurs dans un système photovoltaïque

Convertisseur DC/DC : Il régule la tension continue produite par les panneaux solaires. Il est souvent utilisé pour optimiser le point de puissance maximale (MPPT) et adapter la tension au niveau requis pour le stockage ou l'onduleur. Exemples : Boost, Buck, Buck-Boost.

Convertisseur DC/AC (Onduleur) : Il transforme le courant continu (DC) en courant alternatif (AC), nécessaire pour l'alimentation des charges domestiques ou l'injection dans le réseau électrique. Il joue un rôle clé dans la compatibilité, la sécurité et l'efficacité du système photovoltaïque.

1.11 Typologies des systèmes photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques (PV) sont classés en différentes catégories en fonction de leur configuration et de leur mode de fonctionnement. On distingue principalement trois typologies de systèmes photovoltaïques :

1. **Les systèmes photovoltaïques autonomes**

   Ces systèmes fonctionnent de manière indépendante sans être connectés au réseau électrique. Ils sont utilisés dans des zones isolées où l'accès à l'électricité est limité.

Un système autonome comprend généralement des panneaux solaires, un régulateur de charge, des batteries pour le stockage de l'énergie et parfois un générateur de secours.

2. **Les systèmes photovoltaïques raccordés au réseau**
   Ces systèmes sont connectés au réseau électrique public. L'électricité produite par les panneaux solaires est injectée dans le réseau, permettant ainsi de réduire la consommation d'électricité fournie par le réseau. Ils peuvent fonctionner avec ou sans stockage d'énergie.
3. **Les systèmes photovoltaïques hybrides**
   Ces systèmes combinent l'énergie photovoltaïque avec une autre source d'énergie, comme un générateur diesel ou une éolienne. Ils offrent une meilleure fiabilité en garantissant un approvisionnement en électricité même lorsque l'ensoleillement est insuffisant.

L'adoption d'un type de système dépend des besoins énergétiques, de la disponibilité du réseau électrique et des conditions climatiques. Les avancées technologiques dans le domaine du stockage d'énergie et de la gestion intelligente de l'énergie contribuent à améliorer l'efficacité et la rentabilité des systèmes photovoltaïques[17].

1.12 Applications des systèmes photovoltaïques

- **Alimentation des bâtiments résidentiels et commerciaux** :
  Les systèmes photovoltaïques sont largement utilisés pour produire de l'électricité dans les habitations et les bâtiments commerciaux. En installant des panneaux solaires sur les toits, les particuliers et les entreprises peuvent réduire leur dépendance au réseau électrique et diminuer leurs coûts énergétiques. L'électricité produite peut être consommée directement ou injectée dans le réseau, permettant une rentabilisation de l'investissement.
- **Électrification des zones isolées** :
  Dans les régions éloignées, les systèmes photovoltaïques autonomes offrent une so-

lution efficace pour l'accès à l'électricité. Ils permettent d'alimenter les habitations, les écoles, les hôpitaux et les infrastructures publiques, garantissant ainsi un approvisionnement énergétique fiable. Grâce aux batteries de stockage, l'électricité reste disponible même en l'absence de soleil, assurant ainsi un fonctionnement continu des équipements essentiels.

- **Applications agricoles** :

  Le secteur agricole bénéficie également des avantages du photovoltaïque, notamment pour le pompage d'eau et l'irrigation. Les pompes solaires remplacent les générateurs diesel, réduisant les coûts d'exploitation et l'impact environnemental. D'autres applications incluent l'alimentation des serres, l'éclairage des exploitations agricoles et le fonctionnement des équipements de ventilation et de réfrigération, permettant une meilleure gestion de l'énergie dans les exploitations rurales.

- **Mobilité et transport** :

  L'énergie solaire est également utilisée dans le domaine du transport, notamment avec des véhicules équipés de panneaux photovoltaïques pour prolonger leur autonomie. Les stations de recharge solaire pour véhicules électriques se développent, offrant une alternative durable aux stations classiques et réduisant la pression sur le réseau électrique.

- **Production d'électricité à grande échelle** :

  Les centrales solaires photovoltaïques produisent de l'électricité à grande échelle et l'injectent dans le réseau électrique. Les fermes solaires, installées sur de vastes terrains, permettent de générer plusieurs mégawatts d'énergie renouvelable, contribuant à la transition énergétique et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

1.13 Conclusion

L'énergie solaire, par son abondance et son accessibilité, représente une source renouvelable essentielle dans le contexte de la transition énergétique. La technologie photovoltaïque permet d'exploiter efficacement cette ressource en convertissant le rayonnement solaire en

énergie électrique.

À travers ce chapitre, nous avons présenté les principes de base de l'effet photovoltaïque, les principaux composants d'un système photovoltaïque ainsi que ses différentes configurations. Cette compréhension globale constitue une base indispensable pour aborder l'étude des onduleurs, éléments clés assurant la conversion de l'énergie produite en une forme exploitable par les réseaux électriques ou les charges locales.

Le chapitre suivant portera ainsi sur le rôle de l'onduleur, ses différentes topologies, ainsi que les exigences techniques auxquelles il doit répondre dans un système photovoltaïque.

CHAPITRE 2

Convertisseurs DC/AC (Onduleurs)

2.1 Introduction

Dans les systèmes photovoltaïques, l'énergie électrique produite par les panneaux solaires est de nature continue (DC), tandis que la majorité des équipements domestiques, industriels ou les réseaux électriques publics fonctionnent en courant alternatif (AC). Cette différence de nature impose l'utilisation d'un dispositif électronique capable de transformer cette énergie, tout en respectant des contraintes de qualité, de sécurité et de performance : l'onduleur.

Le convertisseur DC/AC, plus communément appelé onduleur, joue ainsi un rôle central dans l'interface entre la source d'énergie renouvelable et les charges électriques ou le réseau. Il assure non seulement la conversion de la tension, mais intègre également des fonctions avancées telles que le suivi du point de puissance maximale (MPPT), la synchronisation avec le réseau, la gestion des protections et le contrôle de la qualité du signal de sortie.

Ce chapitre s'intéresse aux principes fondamentaux de fonctionnement des onduleurs, à leurs principales topologies (monophasée, triphasée, à un ou plusieurs niveaux), ainsi qu'aux technologies de commutation utilisées (MOSFET, IGBT, SiC, etc.). Il met également en lumière les critères de sélection des onduleurs pour les applications photovoltaïques, notamment en termes de rendement, de plage de tension d'entrée, de compatibilité avec le stockage énergétique, ou encore de performances en matière de réduction des harmoniques.

Enfin, une attention particulière sera accordée aux onduleurs de nouvelle génération dits « intelligents », qui intègrent des capacités de communication, de supervision à distance et d'interaction avec les réseaux intelligents (smart grids), contribuant ainsi à une gestion plus efficiente et sécurisée de l'énergie solaire.

2.2 Définition et rôle d'un onduleur

Un onduleur (ou convertisseur DC/AC) est un dispositif électronique de puissance qui permet de transformer une tension continue en une tension alternative. Dans le cadre d'un système photovoltaïque, il joue un rôle central en assurant la compatibilité entre la source de production (les panneaux solaires, qui délivrent un courant continu) et les charges électriques ou le réseau de distribution, qui nécessite du courant alternatif (AC) pour fonctionner [19].

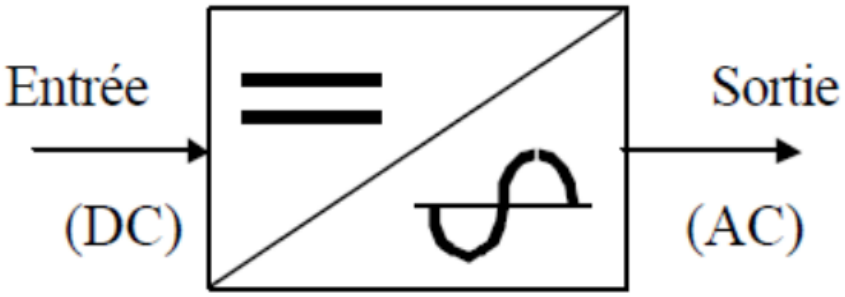

FIGURE 2.1 – *Schéma de principe de l'onduleur.*

Outre la conversion électrique, l'onduleur assure plusieurs fonctions essentielles :
Synchronisation avec le réseau électrique : il adapte la fréquence, la phase et la tension du courant injecté pour qu'elles soient compatibles avec celles du réseau.
Sécurité du système : il détecte les anomalies telles que surtensions, surintensités ou coupures, et peut se déconnecter automatiquement du réseau en cas de dysfonctionnement.
Optimisation de la production d'énergie : grâce à des algorithmes comme le MPPT (Maximum Power Point Tracking), il maximise le rendement de la production photovoltaïque à tout instant [8].
Ainsi, l'onduleur n'est pas simplement un convertisseur électrique, mais un composant intelligent qui assure la qualité, la sécurité et l'efficacité énergétique de tout le système solaire.

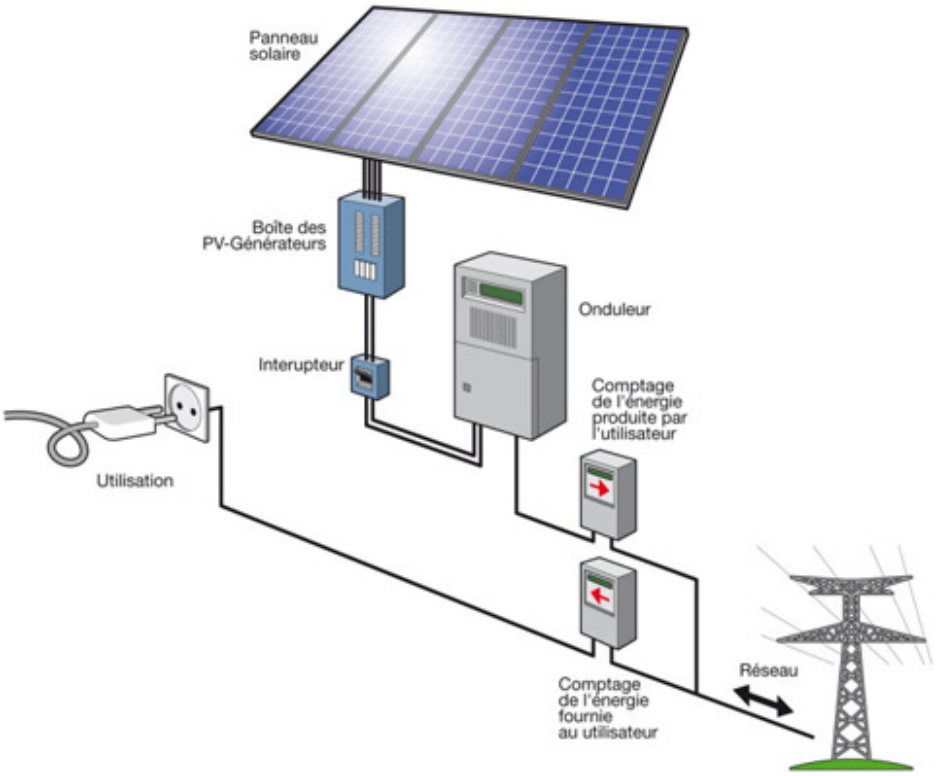

FIGURE 2.2 – *Schéma d'instalation onduleur photovoltaïque.*

2.3 Classification des onduleurs

Un onduleur est un dispositif électronique assurant la conversion statique d'une tension/courant continu en tension /courant alternatif. Il est dit autonome s'il assure de lui même sa fréquence et sa forme d'onde. Deux types d'onduleurs sont donc utilisés pour assurer une telle conversion.

- Onduleur Monophasé.
- Onduleur Triphasé.

2.3.1 Onduleur monophasé

Ce type d'onduleur délivrant à sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement destinée aux alimentations de secours. Deux classes d'onduleurs monophasés sont à distinguer, suivant leur topologie.

2.3.1.1 Demi-pont

Le schéma de principe d'un tel onduleur monté en demi-pont est montré sur la figure :

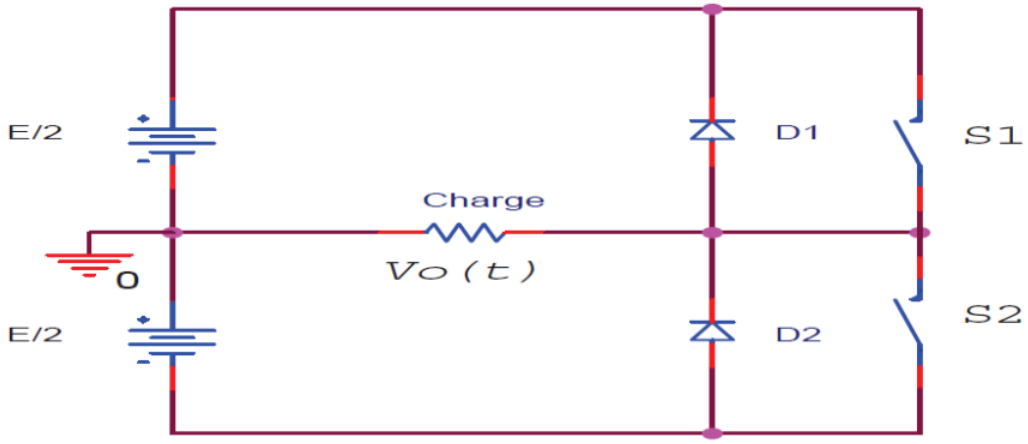

FIGURE 2.3 – *Schéma de Principe d'un Onduleur Monophasé en demi-pont.*

Il est constitué principalement de deux interrupteurs de puissance notés S1 et S2 à commande complémentaire. La durée de conduction de chacun des interrupteurs est alors d'un demi- cycle (180°) correspondant à la fréquence du signal de sortie requis.
Lors de la fermeture de l'interrupteur S1, la tension aux bornes de la charge sera donc de + E/2, et prend la valeur – E/2 quand le second interrupteur, S2 est fermé.
Les diodes D1. D2, dites de retour, assurent la conduction d'un courant négatif en cas de déphasage de ce dernier par rapport à la tension aux bornes de la charge.

2.3.1.2 Pont complet

La structure de base de l'onduleur de tension en pont est illustrée sur la figure. Il se compose de quatre interrupteurs avec des diodes en antiparallèle. La charge est branchée entre les deux bras de l'onduleur [6].

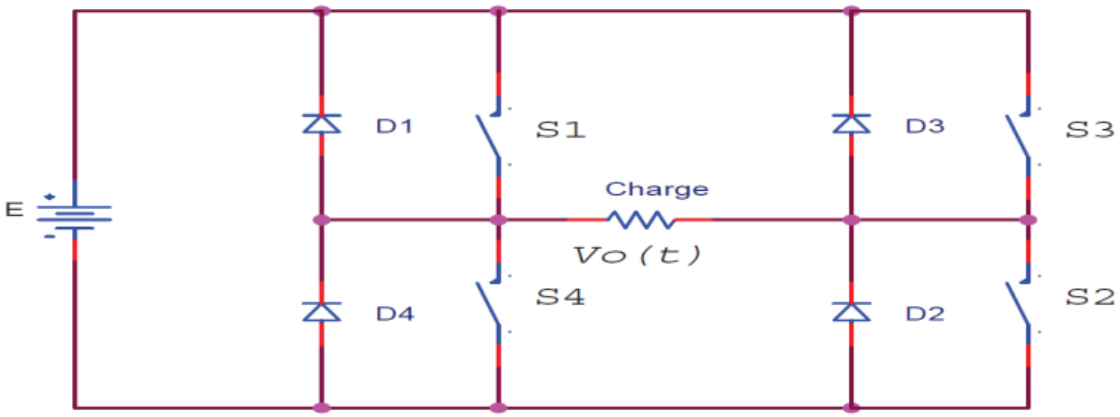

FIGURE 2.4 – *Schéma de puissance de l'onduleur monophasé en pont.*

2.3.2 Onduleur triphasé

Ce type d'onduleur est généralement est utilisé pour les applications de grande puissance. La structure de ce convertisseur est réalisée par l'intermédiaire de l'association, en parallèle, de trois onduleurs monophasés en demi pont (ou en pont) donnant trois tensions de sortie déphasées de 120° degrés, l'une par rapport à l'autre.

2.3.2.1 Structure

Les onduleurs triphasés sont constitués de trois bras, chaque bras se compose de deux interrupteurs. Les interrupteurs choisis constituent bien une cellule de commutation. Leur fonctionnement doit être complémentaire afin de ne pas court-circuiter la source continue) U0. Donc les interrupteurs doivent être bidirectionnels en courant.et se compose soit d'un thyristor et une diode en antiparallèle ou bien un transistor avec une diode en antiparallèle.

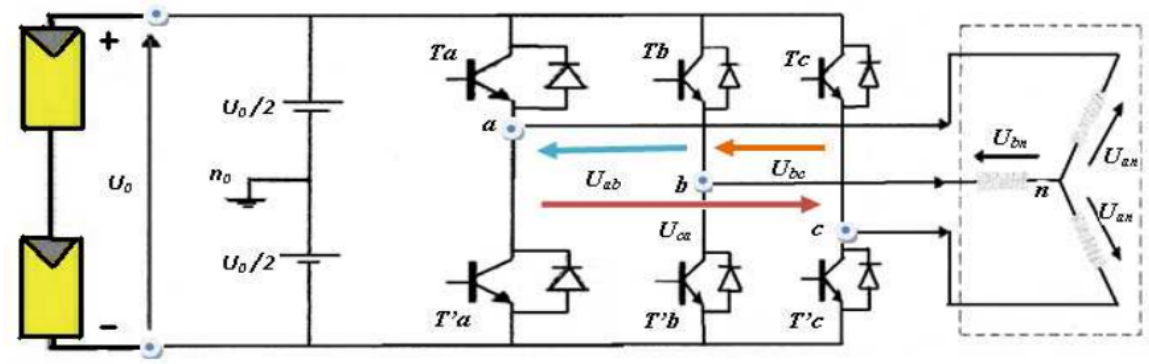

FIGURE 2.5 – *Structure d'un onduleur triphasée.*

2.3.2.2 Principe de fonctionnement

Un onduleur DC/AC est un dispositif électronique dont la fonction principale est de convertir une tension continue (DC), typiquement fournie par des panneaux photovoltaïques ou des batteries, en une tension alternative (AC) compatible avec les réseaux électriques domestiques ou industriels. Cette conversion repose sur l'utilisation de composants électroniques de puissance tels que les transistors à effet de champ à métal-oxyde-semi-conducteur (MOSFET)ou les transistors bipolaires à grille isolée (IGBT), associés à des diodes de roue libre pour gérer le retour de courant et assurer la continuité de la conduction.

Le cœur du processus de conversion est basé sur un pont d'onduleur, souvent configuré en pont complet (full bridge) dans les architectures monophasées. Ce pont est constitué de quatre interrupteurs électroniques qui s'ouvrent et se ferment de manière contrôlée afin d'inverser la polarité de la tension appliquée à la charge. En activant alternativement deux couples d'interrupteurs diagonaux, l'onduleur crée une tension alternative aux bornes de la charge, simulant ainsi le comportement d'un générateur AC.

La fréquence et la forme d'onde du signal de sortie sont déterminées par la stratégie de commande appliquée aux interrupteurs. L'une des techniques les plus répandues est la modulation de largeur d'impulsion (PWM, Pulse Width Modulation). Cette méthode consiste à comparer un signal triangulaire de haute fréquence avec une sinusoïde de référence afin de

générer des signaux de commande pour les interrupteurs. Le résultat est une suite d'impulsions à haute fréquence, dont la largeur varie selon la sinusoïde de référence. Après filtrage (à l'aide d'un filtre passe-bas), cette onde modulée est transformée en une onde sinusoïdale relativement pure, adaptée aux appareils sensibles.

Le fonctionnement d'un onduleur peut se résumer en plusieurs étapes :

1. **Découpage (commutation rapide)** de la tension continue à l'aide des transistors, afin de produire une onde alternative rectangulaire ou modulée.
2. **Filtrage** des harmoniques générées par la commutation, afin d'obtenir une forme d'onde lissée, généralement sinusoïdale.
3. **Commande adaptative**, en fonction de la charge, de la température, et d'éventuelles contraintes de synchronisation (notamment pour les onduleurs raccordés au réseau).

Ce principe est le même pour les onduleurs monophasés ou triphasés, bien que la complexité augmente dans les systèmes à plusieurs phases ou ceux intégrant des structures multiniveaux, qui nécessitent davantage d'interrupteurs et des stratégies de commande plus avancées.

2.4 Techniques de modulation

Les techniques de modulation sont des éléments clés dans la gestion des performances des onduleurs. Elles permettent de contrôler la conversion de l'énergie continue en énergie alternative en ajustant la forme, la fréquence et l'amplitude de l'onde de sortie. Ce contrôle est essentiel pour optimiser la qualité de l'onde sinusoïdale et réduire les pertes énergétiques. Deux techniques principales de modulation sont largement utilisées : la modulation par largeur d'impulsion (PWM) et les techniques avancées telles que la modulation à largeur d'impulsion vectorielle (MLI vectorielle) et la modulation à fréquence variable.

2.4.1 Modulation par largeur d'impulsion (PWM)

La modulation de largeur d'impulsion (PWM) est une méthode de contrôle des interrupteurs dans un onduleur. Elle consiste à moduler la durée des impulsions de commutation pour générer une onde de sortie alternative à partir d'une source de courant continu. Cette modulation permet de simuler une onde sinusoïdale en ajustant la largeur des impulsions en fonction du temps, ce qui permet un contrôle précis de la tension de sortie tout en minimisant les pertes de puissance.

- **Principe de la PWM** : Le principe fondamental de la PWM repose sur la commutation rapide des interrupteurs de l'onduleur entre les états "on" et "off", générant ainsi des impulsions dont la largeur varie en fonction de la tension de référence. Cela permet de simuler une onde sinusoïdale en ajustant la largeur de chaque impulsion pour correspondre à la forme de la sinusoïde souhaitée.
- **Modulation sinusoïdale (SPWM)** : La modulation sinusoïdale par largeur d'impulsion (SPWM) est l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour générer des ondes sinusoïdales de haute qualité. Elle consiste à comparer une porteuse à haute fréquence avec une onde de référence sinusoïdale, ce qui génère un train d'impulsions dont la largeur varie pour suivre la forme de l'onde sinusoïdale. Cette technique permet d'obtenir une onde de sortie avec une distorsion harmonique minimale, ce qui est essentiel dans les applications sensibles à la qualité de la tension, comme les systèmes photovoltaïques.
- **Fréquence de commutation et impact sur les performances** : La fréquence de commutation des interrupteurs a un impact direct sur la performance de l'onduleur. Une fréquence élevée permet de réduire les harmoniques dans l'onde de sortie, mais elle entraîne également des pertes plus importantes dans les composants de puissance, notamment à cause des pertes de commutation et de conduction. Il est donc nécessaire d'optimiser la fréquence de commutation pour obtenir un compromis entre une faible distorsion harmonique et une efficacité énergétique maximale.

2.4.2 Autres techniques : MLI vectorielle, modulation à fréquence variable

Outre la PWM traditionnelle, des techniques avancées de modulation sont employées pour améliorer la gestion de l'énergie et réduire les pertes dans les onduleurs. Ces méthodes permettent de répondre à des exigences spécifiques de performance et de fiabilité dans des applications industrielles complexes.

• **Modulation à largeur d'impulsion vectorielle (MLI vectorielle)** : La modulation à largeur d'impulsion vectorielle (MLI vectorielle) est une méthode plus sophistiquée qui permet de contrôler indépendamment la magnitude et la phase de l'onde de sortie, ce qui améliore l'efficacité énergétique et réduit la distorsion harmonique. Cette technique est particulièrement utile dans les systèmes multi-niveaux et les applications de commande vectorielle, offrant des performances optimales dans des conditions de charge variables.

• **Modulation à fréquence variable** : La modulation à fréquence variable (ou modulation à fréquence de porteuse variable) consiste à ajuster la fréquence de commutation des interrupteurs en fonction des conditions du système et des exigences de charge. Cela permet d'optimiser la gestion de l'énergie, de réduire les pertes et d'améliorer la réponse dynamique de l'onduleur. Cette technique est souvent utilisée dans les systèmes où la demande en puissance fluctue fréquemment, comme dans les applications photovoltaïques hybrides ou les systèmes alimentés par des sources d'énergie renouvelables.

2.5 Composants de puissance utilisés dans les onduleurs

Le fonctionnement optimal d'un onduleur repose essentiellement sur la qualité, la configuration et la sélection judicieuse des composants de puissance. Ces composants électroniques assurent la conversion de l'énergie électrique continue en énergie alternative, tout en garantissant une haute efficacité, une stabilité opérationnelle et une durée de vie prolongée. On distingue principalement les transistors de commutation (IGBT et MOSFET), les diodes de roue libre utilisées pour la protection des composants actifs, ainsi que les filtres passifs (LC) destinés à améliorer la qualité du signal en sortie.

2.5.1 Transistors bipolaires à grille isolée (IGBT)

Les transistors bipolaires à grille isolée, ou IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), représentent aujourd'hui l'un des composants clés dans les onduleurs industriels de moyenne et forte puissance. L'IGBT est un composant hybride qui combine la haute capacité en courant d'un transistor bipolaire (BJT) avec la facilité de commande en tension d'un transistor à effet de champ de type MOSFET. Cette double nature permet une commande simple via une tension de grille, tout en assurant une conduction efficace avec des pertes réduites.
La structure d'un IGBT se compose d'une jonction PNPN et d'une couche isolante qui protège la grille, ce qui permet de le commander sans nécessiter de courant d'entrée élevé. Il peut supporter des tensions de blocage élevées (généralement entre 600 V et 1700 V) et des courants importants (>100 A). Ces caractéristiques en font un choix optimal pour les onduleurs utilisés dans les installations photovoltaïques raccordées au réseau, où les exigences de robustesse et de rendement sont critiques.
Cependant, les IGBT présentent des temps de commutation plus élevés que les MOSFET, ce qui limite leur utilisation à des fréquences inférieures à environ 20 kHz. Une fréquence de commutation trop élevée entraînerait des pertes de commutation importantes, une génération de chaleur excessive et une baisse d'efficacité. C'est pourquoi ils sont souvent associés à des dispositifs de dissipation thermique (radiateurs, ventilateurs) pour assurer une gestion thermique adéquate.

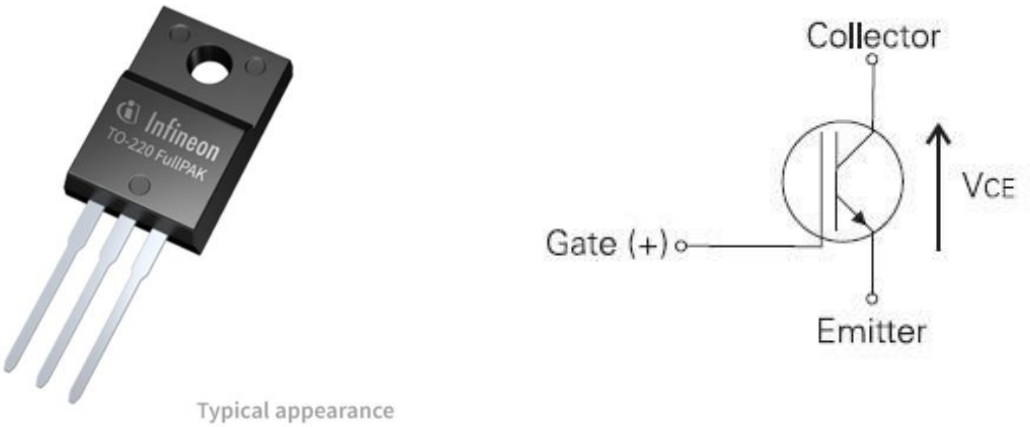

FIGURE 2.6 – *Schéma Transistors bipolaires à grille isolée (IGBT)*

2.5.2 Transistors à effet de champ (MOSFET)

Les MOSFET (*Metal-Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor*) sont des interrupteurs à commande en tension, réputés pour leur rapidité de commutation et leurs pertes réduites à haute fréquence. Contrairement aux IGBT, les MOSFET sont plus performants en fréquence, ce qui les rend parfaitement adaptés aux applications de faible et moyenne puissance, notamment dans les micro-onduleurs, les convertisseurs DC-DC embarqués et les systèmes photovoltaïques autonomes.

Le fonctionnement d'un MOSFET repose sur une modulation du canal de conduction entre le drain et la source à l'aide d'une tension appliquée sur la grille isolée. La principale caractéristique des MOSFET est leur très faible résistance à l'état passant (R_{DS(on)}), ce qui permet de minimiser les pertes par effet Joule. Par ailleurs, leur capacité à commuter à des fréquences supérieures à 100 kHz permet d'obtenir des convertisseurs plus compacts, avec des composants passifs de taille réduite.

Cependant, leur tension de blocage est généralement limitée à des niveaux plus faibles que ceux des IGBT, avec des valeurs typiques allant jusqu'à 600 V. En conséquence, les MOSFET sont souvent utilisés dans des topologies multiniveaux où la tension est répartie entre plusieurs étages, ce qui permet de bénéficier de leurs avantages tout en limitant leur exposition à des tensions trop élevées.

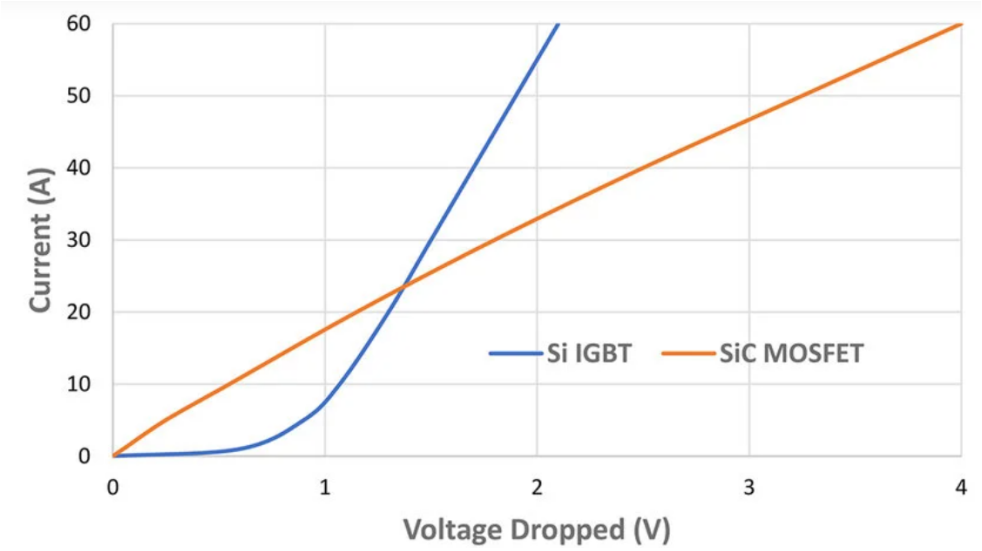

FIGURE 2.7 – *Schéma comparatif IGBT vs MOSFET.*

2.5.3 Diodes de roue libre et filtres LC

Dans tout circuit d'onduleur, la présence de composants inductifs engendre un phénomène de récupération d'énergie lorsque les interrupteurs se bloquent. Ce phénomène, s'il n'est pas contrôlé, peut générer des surtensions dommageables pour les transistors. Les diodes de roue libre, également appelées diodes de récupération ou diodes de clampage, sont insérées en parallèle des interrupteurs pour offrir un chemin de conduction alternatif au courant inductif. Elles protègent ainsi les composants de puissance contre les pics de tension et améliorent la fiabilité du système.
Ces diodes doivent être sélectionnées selon leur capacité à gérer des régimes transitoires intenses, notamment en ce qui concerne la vitesse de recouvrement inverse et les capacités parasites, qui influencent directement les pertes de commutation. Dans les onduleurs modernes, des diodes Schottky ou des diodes rapides sont souvent utilisées, en fonction du niveau de tension et de la fréquence de fonctionnement.
En complément, les filtres LC sont utilisés pour lisser la forme d'onde en sortie de l'onduleur. Étant donné que les techniques de modulation, comme la PWM, génèrent des composantes à haute fréquence, il est indispensable de filtrer ces harmoniques afin d'obtenir une tension sinusoïdale propre. Un filtre LC bien dimensionné réduit significativement la distorsion harmonique totale (THD), protège les charges sensibles, et permet de satisfaire les normes de compatibilité électromagnétique. Le choix des valeurs de l'inductance et de la capacité dépend de la fréquence de commutation, de la charge alimentée et du niveau de THD admissible.

2.5.4 Choix des composants selon la fréquence de fonctionnement

Le choix des composants dans un onduleur ne peut être dissocié des considérations de fréquence de commutation, de tension d'entrée et de sortie, de puissance à transférer, ainsi que des exigences de rendement et de dissipation thermique. Les IGBT sont adaptés aux applications de forte puissance fonctionnant à des fréquences basses ou moyennes (jusqu'à 20 kHz), tandis que les MOSFET sont mieux adaptés aux applications nécessitant des fréquences élevées (jusqu'à plusieurs centaines de kHz), où les pertes de commutation doivent

être minimisées.
La fréquence de commutation influence directement les performances thermiques et le dimensionnement des filtres. Une fréquence élevée permet de réduire la taille des composants passifs mais augmente les pertes par commutation et le stress thermique. À l'inverse, une fréquence basse réduit les pertes de commutation, mais nécessite des inductances et capacités plus volumineuses pour obtenir une qualité de signal acceptable.
Ainsi, l'optimisation d'un onduleur passe par une analyse fine des compromis entre rapidité de commutation, rendement, coût, compacité, et fiabilité. Le choix technologique des composants doit être effectué en fonction de l'application cible : onduleur résidentiel, industriel, embarqué, ou à destination des réseaux photovoltaïques intelligents.

2.6 Critères de performance d'un onduleur

L'évaluation des performances d'un onduleur repose sur plusieurs critères techniques qui permettent d'apprécier sa capacité à convertir efficacement l'énergie, à s'adapter dynamiquement aux conditions de fonctionnement et à répondre aux exigences normatives. Ces critères influencent non seulement la qualité de l'énergie délivrée, mais aussi la fiabilité, la durabilité et la rentabilité économique de l'installation. Les principaux paramètres à considérer sont le rendement global, la distorsion harmonique, la réponse dynamique, la gestion thermique, ainsi que le coût et l'encombrement.

2.6.1 Rendement de conversion

Le rendement d'un onduleur, noté , représente le rapport entre la puissance utile délivrée en sortie (AC) et la puissance électrique absorbée en entrée (DC). Il s'exprime généralement en pourcentage :

$$\eta = \left(\frac{P_{\text{sortie}}}{P_{\text{entrée}}} \right) \times 100$$

Un rendement élevé (souvent supérieur à 95 %) est essentiel pour limiter les pertes énergétiques sous forme de chaleur et maximiser la production d'énergie, en particulier dans les systèmes photovoltaïques. Ce rendement varie selon les conditions de charge, la température

ambiante, la qualité des composants utilisés et la stratégie de commande adoptée. Certains onduleurs intègrent des algorithmes d'optimisation du point de puissance maximale (MPPT) pour améliorer encore leur efficacité en fonctionnement réel.

Les pertes dans l'onduleur peuvent être classées en deux grandes catégories : les pertes de conduction, dues à la résistance interne des interrupteurs en état passant, et les pertes de commutation, liées aux transitions entre les états ON et OFF des transistors. L'optimisation du rendement passe par un choix judicieux des composants, une commande adaptée et une gestion thermique efficace.

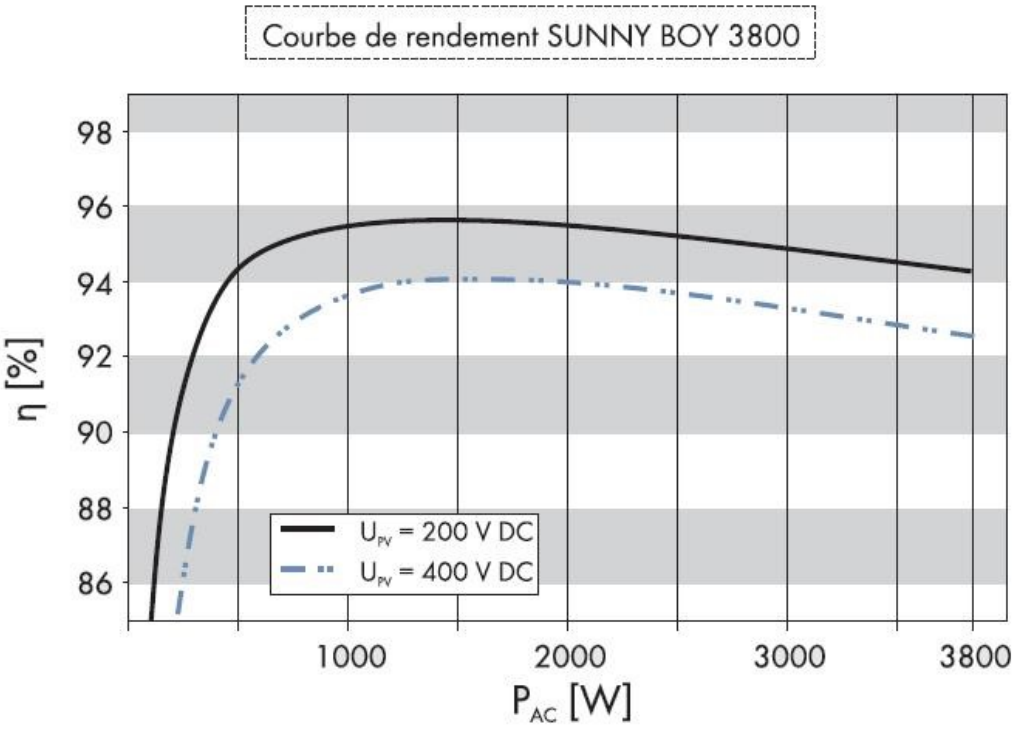

FIGURE 2.8 – *Courbe de rendement d'un onduleur.*

2.6.2 Distorsion harmonique totale (THD)

La distorsion harmonique totale, ou THD (Total Harmonic Distortion), mesure la déviation d'un signal par rapport à une sinusoïde parfaite. Elle est définie comme le rapport entre

la somme des puissances des composantes harmoniques et celle de la fondamentale :

$$\mathrm{THD} = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{V_n}{V_1}\right)^2} \times 100$$

Un THD faible est indispensable pour garantir la compatibilité électromagnétique et la qualité de l'énergie injectée dans le réseau ou fournie aux charges sensibles. Les normes internationales, telles que l'IEEE 519 ou l'IEC 61000, imposent des limites strictes sur le taux d'harmoniques toléré, souvent inférieur à 5 % pour la tension en sortie.
La distorsion harmonique dépend fortement de la technique de modulation utilisée (PWM, SPWM, MLI vectorielle, etc.), de la fréquence de commutation, et de l'efficacité des filtres de sortie. Une mauvaise maîtrise des harmoniques peut entraîner des dysfonctionnements dans les équipements connectés, une surchauffe des transformateurs, ou encore des pertes supplémentaires dans les moteurs électriques.

2.6.3 Réponse dynamique

La réponse dynamique d'un onduleur décrit sa capacité à réagir rapidement aux variations des conditions d'entrée (tension, irradiation solaire) ou de la charge. Cette propriété est cruciale dans les systèmes connectés au réseau où l'onduleur doit synchroniser sa tension et sa fréquence avec celles du réseau, ou encore dans les systèmes autonomes soumis à des fluctuations de charge.
Une bonne réponse dynamique se traduit par une reprise rapide du régime nominal après une perturbation (coupure momentanée, variation de tension d'entrée, changement brutal de charge). Cela dépend de la vitesse de la boucle de régulation (courant, tension, fréquence), de la stratégie de commande utilisée (commande vectorielle, commande directe de couple, etc.), et des performances du microcontrôleur ou DSP embarqué.
Dans les systèmes photovoltaïques, la dynamique est également influencée par le comportement du contrôleur MPPT qui doit suivre rapidement le point de puissance maximale lors des variations d'ensoleillement.

2.6.4 Fiabilité et dissipation thermique

La fiabilité d'un onduleur est sa capacité à fonctionner de manière stable et durable sur le long terme, sans pannes ni dégradations majeures. Cette fiabilité est étroitement liée à la qualité des composants, à la robustesse de la conception électronique, et surtout à la gestion thermique.

Les pertes dans les composants de puissance se traduisent en chaleur, qui doit être évacuée efficacement pour éviter les surtensions thermiques susceptibles d'endommager les transistors, les diodes ou les circuits de commande. Les systèmes de refroidissement passifs (radiateurs) ou actifs (ventilation, refroidissement liquide) sont essentiels pour maintenir une température de fonctionnement sécurisée.

Le dimensionnement de ces dispositifs dépend de la densité de puissance, de la température ambiante, de la ventilation disponible et de la surface d'échange thermique. Un mauvais refroidissement peut provoquer des défaillances prématurées, réduire le rendement, ou déclencher des mécanismes de protection qui limitent la production.

2.6.5 Coût et encombrement

Dans les applications industrielles et résidentielles, le coût et l'encombrement constituent également des critères importants. L'objectif est de concevoir des onduleurs à la fois performants et économiquement viables, tout en respectant les contraintes d'espace et d'intégration. Le choix des composants (IGBT vs MOSFET, capacité des filtres, type de contrôleur), la fréquence de commutation (qui influence la taille des filtres), et le type de refroidissement ont un impact direct sur le coût final et la taille de l'onduleur.

Les avancées technologiques récentes, notamment l'intégration de composants à semi-conducteurs à large bande interdite (SiC, GaN), permettent de concevoir des onduleurs plus compacts, plus rapides, et plus efficaces, bien que leur coût initial soit plus élevé. Le compromis entre performance, coût, compacité et durée de vie doit être soigneusement étudié en fonction de l'application cible.

2.7 Normes et exigences techniques

La conception, la fabrication et l'intégration des onduleurs dans des systèmes énergétiques — notamment photovoltaïques — doivent respecter un ensemble de normes techniques et de réglementations internationales. Ces exigences garantissent non seulement la sécurité des utilisateurs, mais aussi la compatibilité électromagnétique avec le réseau électrique, la fiabilité de fonctionnement et l'harmonisation entre les équipements. Trois catégories de normes peuvent être distinguées : les normes de sécurité, les exigences spécifiques aux systèmes photovoltaïques, et les normes de connexion au réseau.

2.7.1 Normes de sécurité et compatibilité

Les onduleurs doivent être conformes à un ensemble de normes de sécurité électrique, mécaniques et environnementales. Ces normes couvrent des aspects tels que :

- **Protection contre les surtensions** et courts-circuits,
- **Isolation galvanique** entre entrée DC et sortie AC,
- **Échauffement maximal admissible** des composants,
- **Protection contre les chocs électriques**,
- **Rayonnement électromagnétique (CEM)**.

Les principales normes sont :

- **IEC 62109-1 / IEC 62109-2** : sécurité des convertisseurs de puissance pour applications photovoltaïques (normes de référence pour les onduleurs PV).
- **IEC 61000** : compatibilité électromagnétique (CEM), y compris la limitation des émissions de perturbations.
- **UL 1741** (États-Unis) : norme de sécurité pour les onduleurs, convertisseurs et contrôleurs de puissance pour systèmes d'énergie renouvelable.
- **IEEE C62.41** : guide sur la gestion des surtensions transitoires dans les systèmes de basse tension.

2.7.2 Exigences spécifiques aux systèmes photovoltaïques

Les onduleurs PV doivent intégrer certaines fonctions spécifiques liées à leur interaction avec les générateurs solaires, comme :

- Le suivi du point de puissance maximale (MPPT) : il permet d'extraire la puissance optimale du champ photovoltaïque malgré les variations d'ensoleillement et de température.
- La détection de défauts de terre et d'îlotage :
  - Îlotage : situation où l'onduleur continue à injecter de l'énergie dans un réseau déconnecté. C'est dangereux et interdit.
  - Norme : IEC 62116 fournit les méthodes d'essai pour la détection d'îlotage.
- La protection contre l'inversion de polarité, la surtension DC, ou encore les surintensités.
- La capacité à supporter les phénomènes d'ombrage partiel, sans provoquer d'instabilité de la tension d'entrée.

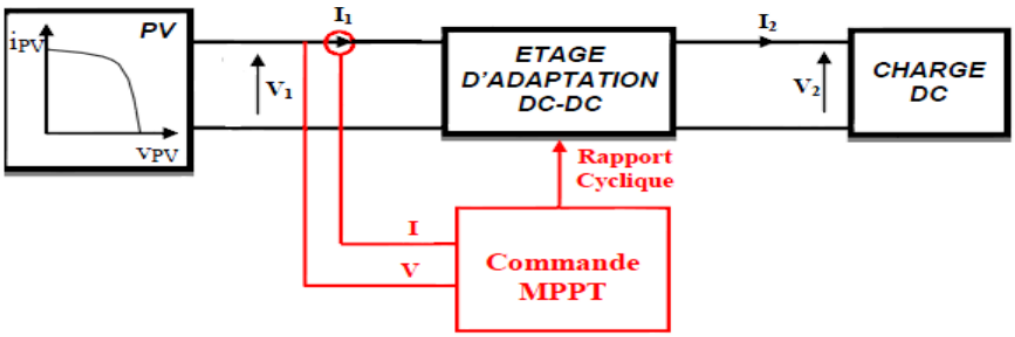

FIGURE 2.9 – *Schéma fonctionnel général du système photovoltaïque avec MPPT.*

2.7.3 Normes de connexion au réseau électrique

Dans les systèmes connectés au réseau (grid-tied), l'onduleur doit synchroniser sa fréquence, sa tension et sa phase avec celles du réseau. Il doit également :

- Réagir aux variations de fréquence et de tension du réseau (grâce à des modes de réponse prédéfinis),

- Limiter les harmoniques injectées dans le réseau (< 5 % selon IEEE 519),
- Fournir des services auxiliaires comme la régulation de puissance réactive (normes VDE-AR-N 4105, EN 50549),
- Se déconnecter automatiquement du réseau en cas de détection de défaut.

La **norme IEEE 1547** [3] est une référence clé dans le domaine de l'interconnexion des onduleurs au réseau électrique. Elle spécifie :

- La plage de fréquence autorisée : souvent de 49,5 à 50,5 Hz pour les réseaux 50 Hz,
- La plage de tension acceptable : typiquement entre 90 % et 110 % de la tension nominale,
- Les temps de réponse pour déconnexion/reconnexion.

$$\theta(t) = \int_0^t \omega_{\text{réseau}}(\tau)\, d\tau$$

où $\theta(t)$ est la phase du signal généré par l'onduleur, et $\omega_{\text{réseau}}$ est la fréquence instantanée du réseau.

Normes et standards techniques

- **IEC 62109-1/2** – *Safety of power converters for use in photovoltaic power systems*, International Electrotechnical Commission, 2010.
- **IEEE Std 1547-2018** – *Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces*.
- **IEC 61000 Series** – *Electromagnetic Compatibility (EMC) Standards*, International Electrotechnical Commission.
- **UL 1741** – *Standard for Inverters, Converters, Controllers and Interconnection System Equipment for Use With Distributed Energy Resources*.
- J. Carr, J. Balda, *Power Electronics Handbook*, Academic Press, 2018.

2.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté de manière détaillée les fondements théoriques et technologiques des convertisseurs statiques DC/AC, appelés également onduleurs. Ces

dispositifs assurent une fonction essentielle dans les systèmes de conversion d'énergie, notamment dans le cadre des installations photovoltaïques, en transformant l'énergie continue générée par les panneaux solaires en énergie alternative compatible avec le réseau ou les équipements électriques.

Nous avons exploré les différentes structures d'onduleurs, qu'ils soient monophasés ou triphasés, à tension ou à courant, ainsi que les principales topologies utilisées dans l'industrie. Les techniques de commande, notamment la modulation de largeur d'impulsion (PWM), ont été analysées en tant que solutions performantes pour améliorer la qualité de l'onde de sortie, réduire les pertes et garantir une meilleure efficacité énergétique. Ce chapitre a également permis de mettre en évidence les critères industriels de sélection d'un convertisseur, tels que le rendement, la fiabilité, la complexité de mise en œuvre, et la conformité aux normes en vigueur.

L'ensemble des éléments traités constitue une base technique solide pour les développements ultérieurs de ce mémoire. Les chapitres suivants seront consacrés à la conception, à la modélisation et à la simulation d'un onduleur adapté aux spécificités d'un système photovoltaïque, avec pour objectif d'optimiser ses performances dans un contexte d'exploitation réel.

CHAPITRE 3

Les onduleurs dans les systèmes photovoltaïques

3.1 Introduction

Les systèmes photovoltaïques, devenus incontournables dans la production d'électricité à partir de sources renouvelables, génèrent une énergie sous forme de courant continu (DC), qui n'est pas directement exploitable par la majorité des équipements électriques ni compatible avec les réseaux de distribution. C'est dans ce contexte que l'onduleur s'impose comme un composant fondamental, jouant le rôle de lien fonctionnel entre la production photovoltaïque et la consommation ou l'injection sur le réseau.

Au-delà de la simple conversion du courant continu en courant alternatif (AC), l'onduleur assure de multiples fonctions essentielles telles que l'optimisation du point de puissance maximale (MPPT), la protection du système, le contrôle de la qualité de l'énergie injectée, et l'adaptation aux normes réseau. Il influence de manière significative le rendement global, la fiabilité, et la durabilité de l'installation. Ainsi, la performance d'un système photovoltaïque dépend en grande partie de la technologie et de l'efficacité de son onduleur.

Ce chapitre vise à mettre en lumière le rôle stratégique de l'onduleur dans les systèmes photovoltaïques, en analysant ses fonctions principales, ses différentes topologies, ainsi que les innovations récentes visant à améliorer sa performance et son adaptabilité aux besoins modernes.

3.2 Rôle de l'onduleur dans un système photovoltaïque

Dans un système photovoltaïque, l'onduleur constitue un élément indispensable pour assurer la conversion de l'énergie électrique produite par les panneaux solaires. Les modules photovoltaïques génèrent une tension en courant continu (DC), tandis que la majorité des appareils électriques et le réseau public fonctionnent en courant alternatif (AC). L'onduleur permet donc la transformation du courant continu en courant alternatif, tout en assurant la qualité, la sécurité et la stabilité de cette conversion. Plusieurs fonctions essentielles sont assurées par l'onduleur :

- **Conversion DC/AC** : C'est la fonction principale. L'onduleur transforme le courant produit par les panneaux solaires en une forme exploitable par les appareils domestiques ou injectable dans le réseau [13].
- **Suivi du point de puissance maximale (MPPT)** : L'onduleur optimise la production d'énergie en recherchant en permanence le point de fonctionnement qui maximise la puissance délivrée par les panneaux [26].
    - **Protection et sécurité** : Il protège le système contre les surtensions, les surintensités, les défauts d'isolement ou d'ilotage, assurant une connexion sécurisée au réseau électrique [11].
- **Communication et monitoring** : Les onduleurs récents disposent de modules de communication permettant la supervision à distance de la production et du rendement énergétique du système.

L'onduleur est donc bien plus qu'un simple convertisseur. Il agit comme le cerveau du système photovoltaïque, garantissant non seulement la conversion d'énergie mais aussi la performance, la durabilité et l'intelligence du système global.

3.3 Classification des onduleurs pour systèmes photovoltaïques

Dans les systèmes photovoltaïques, l'onduleur constitue l'un des éléments les plus critiques, car il assure la conversion du courant continu (DC) généré par les panneaux solaires

en courant alternatif (AC), exploitable par les réseaux électriques ou les équipements domestiques et industriels. Toutefois, la diversité des besoins, des puissances installées, des architectures de systèmes, et des conditions d'exploitation a conduit au développement de différentes technologies d'onduleurs. Cette section propose une classification des onduleurs selon trois critères principaux : l'architecture du système, la technologie de commutation, et les types de composants de puissance utilisés. Chacune de ces catégories présente des avantages spécifiques en fonction des applications visées.

3.3.1 Classification selon l'architecture du système

L'architecture d'un système photovoltaïque influence directement le type d'onduleur à utiliser. On distingue généralement les configurations suivantes :

- **Onduleur centralisé** :

  Ce type d'onduleur est conçu pour être connecté à un grand nombre de panneaux photovoltaïques groupés en un seul champ. L'ensemble des modules solaires est câblé en parallèle ou en série, et toute l'énergie produite est acheminée vers un onduleur unique. Ce modèle est particulièrement utilisé dans les centrales solaires de grande taille ou les installations industrielles. Il présente l'avantage d'un coût réduit par kilowatt installé, mais souffre d'une moindre tolérance aux ombrages partiels, aux différences d'orientation ou à l'encrassement des modules. De plus, toute défaillance de l'onduleur entraîne l'arrêt de l'ensemble de la production.

- **Onduleur de chaîne (ou string)** :

  Cette configuration est basée sur la connexion de plusieurs chaînes de modules photovoltaïques, chacune raccordée à un onduleur dédié. Elle permet une meilleure flexibilité dans la conception des systèmes et une gestion plus fine des performances, notamment lorsqu'il existe des différences d'orientation ou d'ensoleillement entre les différentes chaînes. Elle est couramment utilisée dans les installations résidentielles et tertiaires de puissance moyenne.

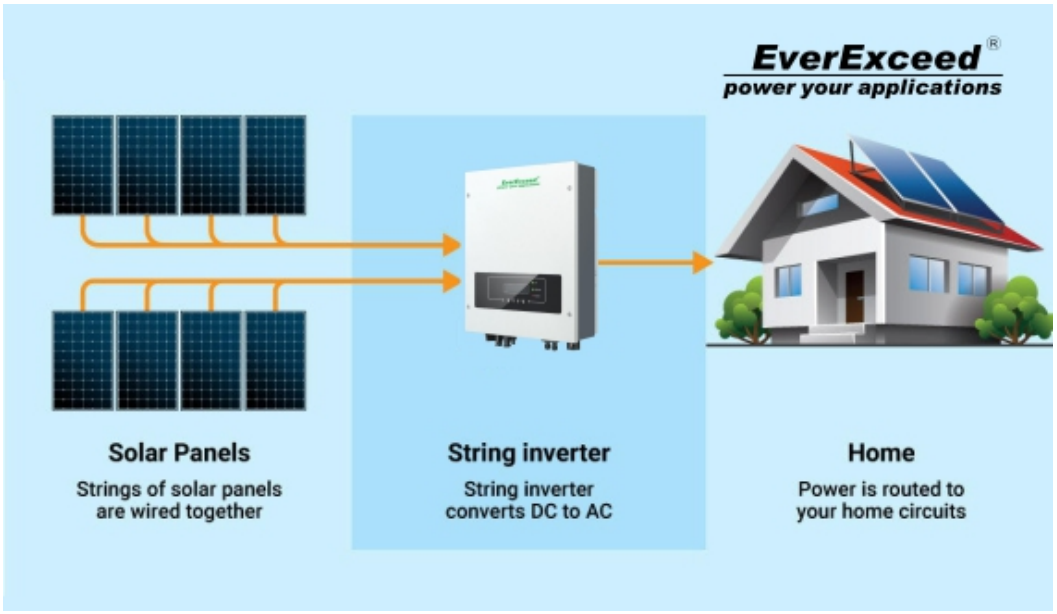

FIGURE 3.1 – *Schema onduleur chaine(string).*

– **Micro-onduleur** :

Dans cette architecture, chaque panneau photovoltaïque est équipé de son propre onduleur. Cette approche permet un suivi indépendant du point de puissance maximale (MPPT) pour chaque module, maximisant ainsi la production d'énergie, même en présence d'ombrages partiels ou de variations de performance entre les panneaux. Bien que le coût initial soit plus élevé, les micro-onduleurs sont particulièrement adaptés aux petites installations résidentielles, où la simplicité d'installation et la modularité sont recherchées.

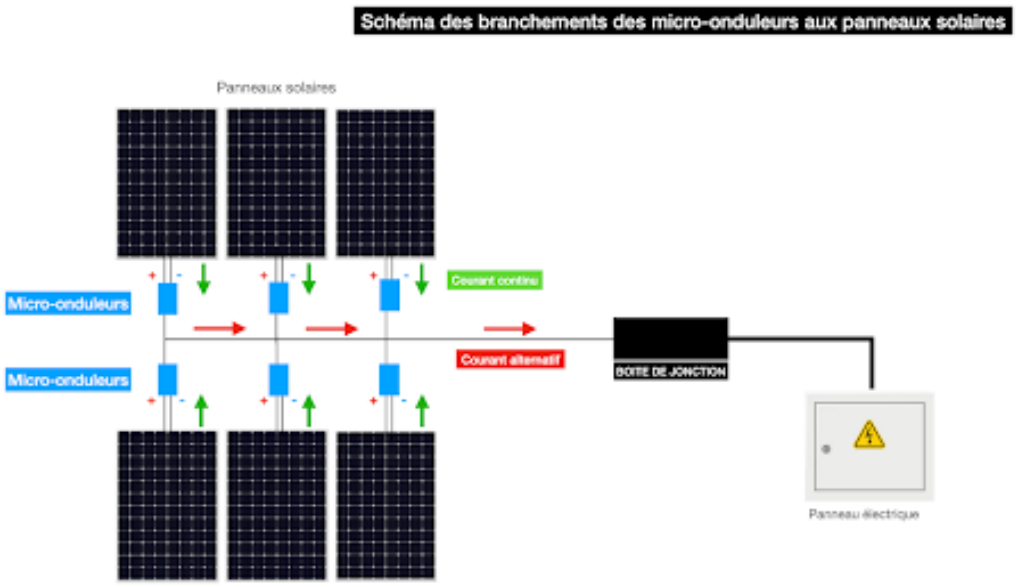

FIGURE 3.2 – *Schema instalation photovoltaique micro onduleur.*

– **Onduleur hybride** :

L'onduleur hybride est capable de gérer à la fois la production solaire et le stockage d'énergie via des batteries. Il permet une plus grande autonomie énergétique, en assurant la charge et la décharge des batteries selon la production, la consommation et la disponibilité du réseau. Ce type d'onduleur est de plus en plus utilisé dans les systèmes d'autoconsommation avec stockage, notamment dans les zones où le réseau électrique est instable ou inexistant.

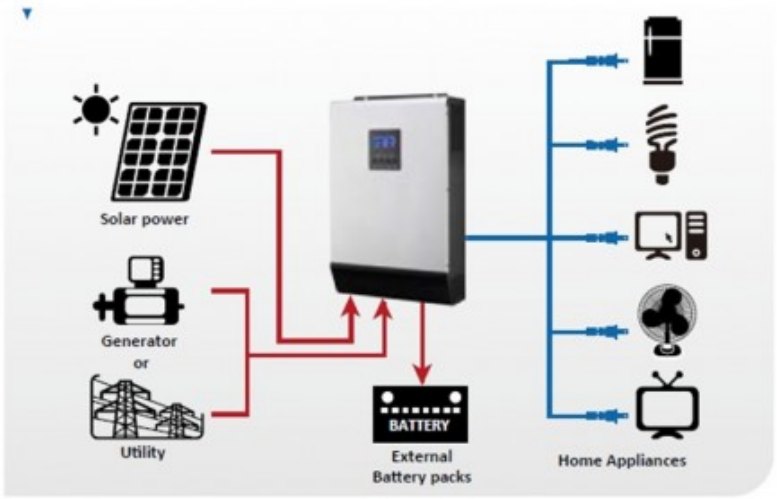

FIGURE 3.3 – *Schéma onduleur hybride.*

3.3.2 Classification selon le type de commutation

La topologie de l'onduleur, c'est-à-dire la manière dont il génère la tension alternative à partir du courant continu, détermine la qualité de la conversion et le rendement global du système.

- **Onduleur à deux niveaux (2-level inverter)** :

  Il s'agit de la topologie la plus simple et la plus répandue, dans laquelle la tension de sortie alterne entre deux niveaux (positif et négatif). Ces onduleurs utilisent généralement une modulation par largeur d'impulsion (PWM) pour synthétiser une forme d'onde proche d'une sinusoïde. Bien qu'ils soient simples à mettre en œuvre, leur principal inconvénient réside dans le niveau élevé d'harmoniques générés, nécessitant souvent des filtres de sortie.

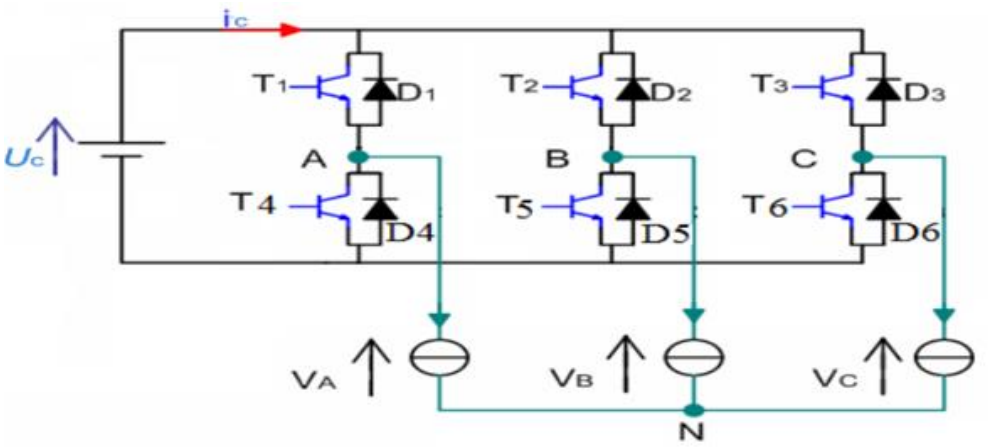

FIGURE 3.4 – *Schéma onduleur triphasé a deux niveaux.*

– **Onduleur multiniveaux (Multilevel Inverter)** :

Afin d'améliorer la qualité de la tension de sortie et de réduire les pertes par commutation, les onduleurs multiniveaux ont été développés. Ils permettent de générer une tension alternative à plusieurs niveaux intermédiaires, ce qui réduit les distorsions harmoniques et diminue les contraintes sur les composants.

Les topologies les plus courantes incluent :

1. NPC (Neutral Point Clamped) : utilise des diodes de blocage pour créer plusieurs niveaux de tension.
2. T-Type : améliore le rendement en réduisant les pertes de commutation.
3. Flying Capacitor et Cascaded H-Bridge : utilisées dans les systèmes de forte puissance ou modulaires.

3.3.3 Classification selon les composants de commutation

Le choix des composants de puissance conditionne fortement les performances, la fiabilité et le coût de l'onduleur. Les semi-conducteurs utilisés assurent la commutation rapide des tensions et courants élevés.

– **MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)** :

Ces composants sont très efficaces pour les applications à faible tension et haute fré-

quence, en raison de leur rapidité de commutation et de leurs faibles pertes. Ils sont souvent utilisés dans les micro-onduleurs ou les étages DC/DC.

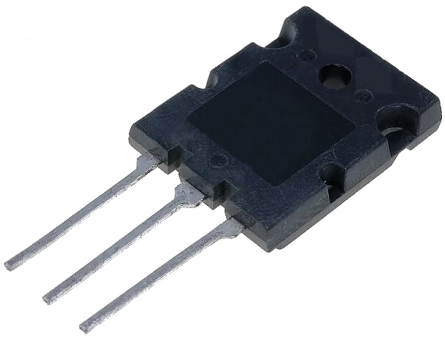

FIGURE 3.5 – *MOSFET.*

– **IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)** :

Les IGBT sont privilégiés dans les onduleurs de moyenne à forte puissance, grâce à leur capacité à supporter de fortes tensions et courants, tout en conservant un bon rendement. Ils sont largement utilisés dans les onduleurs string et centralisés.

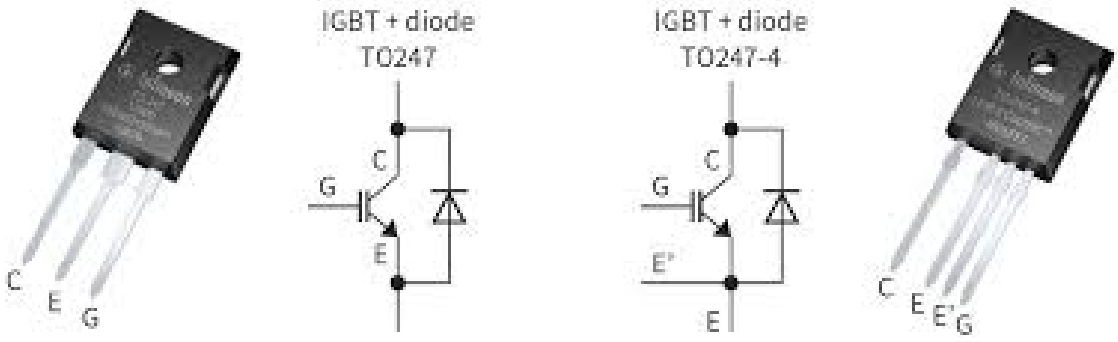

FIGURE 3.6 – *Schéma IGBT.*

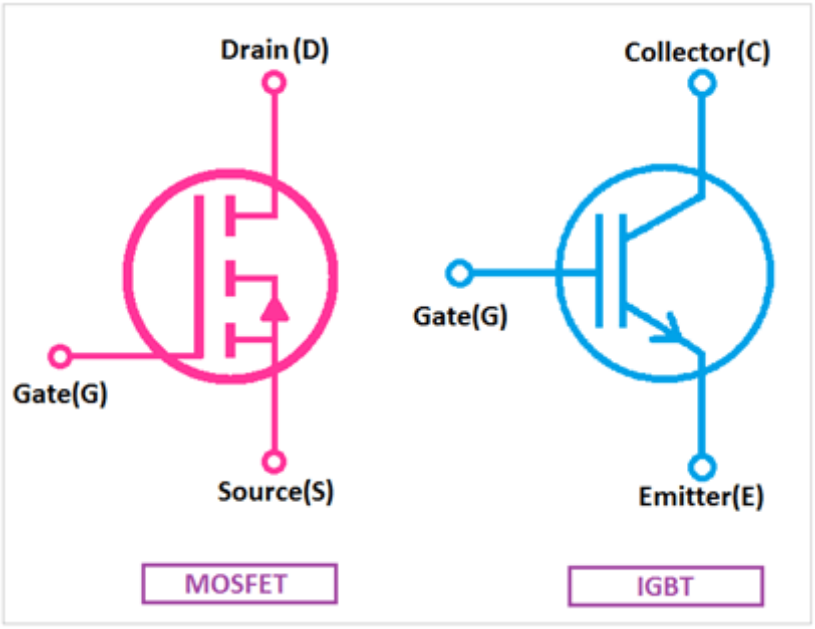

FIGURE 3.7 – *Schéma différence entre MOSFET et IGBT.*

– **SiC** (carbure de silicium) :

  Le SiC est un semi-conducteur de nouvelle génération qui permet de fonctionner à des températures et fréquences plus élevées, avec des pertes de commutation très faibles. Les onduleurs à base de SiC sont plus compacts, plus légers et plus efficaces, bien qu'ils restent plus coûteux. Ils sont de plus en plus utilisés dans les applications de haute performance, y compris dans les onduleurs hybrides ou industriels.

– **GaN** (nitrure de gallium) :

  Le GaN est un matériau émergent, offrant des performances supérieures au SiC à haute fréquence. Il permet une miniaturisation extrême des convertisseurs et une très faible dissipation thermique. Bien qu'encore limité en termes de disponibilité commerciale et de coût, le GaN est très prometteur pour les applications mobiles, résidentielles haut de gamme, et les technologies embarquées.

3.4 Caractéristiques techniques attendues d'un onduleur photovoltaïque

Le choix d'un onduleur pour une installation photovoltaïque repose sur un ensemble de critères techniques essentiels qui conditionnent à la fois les performances énergétiques, la durabilité du système et sa compatibilité avec les exigences de l'installation. Parmi ces caractéristiques, certaines sont aujourd'hui considérées comme fondamentales pour garantir un fonctionnement optimal :

Rendement de conversion :

Le rendement, ou efficacité énergétique, mesure la capacité de l'onduleur à convertir l'énergie du courant continu (DC) en courant alternatif (AC) avec un minimum de pertes. Les onduleurs modernes affichent des rendements supérieurs à 97 %, voire jusqu'à 99 % pour les modèles haut de gamme dotés de composants avancés [13].

Plage de tension d'entrée (MPPT) :

Un bon onduleur doit disposer d'un large intervalle de suivi du point de puissance maximale (MPPT), permettant d'exploiter efficacement l'énergie produite même en cas de variation d'ensoleillement ou de température. Cette capacité est indispensable pour maximiser la productivité des modules photovoltaïques.

Type de signal de sortie :

La qualité du signal en sortie est un autre critère déterminant. Les onduleurs les plus performants produisent un signal sinusoïdal pur, parfaitement compatible avec les appareils électriques sensibles et les normes du réseau. À l'inverse, les signaux pseudo-sinusoïdaux sont limités à des usages non critiques.

Utilisation de composants modernes :

L'intégration de semi-conducteurs avancés, tels que le SiC (carbure de silicium) et le GaN (nitrure de gallium), permet d'améliorer considérablement la fréquence de commutation, de réduire les pertes, d'augmenter la densité de puissance, et de réduire la taille et le poids des onduleurs [11].

Compatibilité avec les systèmes de stockage :

Les onduleurs hybrides sont conçus pour fonctionner avec des batteries, permettant ainsi la gestion de l'autoconsommation et du stockage d'énergie. Ils assurent une gestion intelli-

gente de la charge et de la décharge, avec une transition fluide entre les différentes sources (PV, batterie, réseau).

Systèmes de protection et monitoring :

Un onduleur fiable doit intégrer des systèmes de protection contre les surtensions, les surintensités, les courts-circuits, et l'îlotage. En parallèle, des outils de monitoring avancés (via Wi-Fi, RS485, ou Ethernet) permettent de suivre en temps réel la performance du système, facilitant la maintenance préventive et la gestion à distance [26].

3.5 Importance du choix technologique

Le choix technologique de l'onduleur dans un système photovoltaïque revêt une importance stratégique, tant sur le plan de la performance énergétique que sur celui de la fiabilité à long terme du système. L'onduleur, en tant que lien critique entre les panneaux solaires et le réseau ou les charges électriques, doit répondre à des exigences précises en matière de conversion, de sécurité, de rendement et d'intelligence de gestion.

Un choix technologique inadapté peut entraîner :

- ✓ Une perte significative d'énergie due à un rendement de conversion insuffisant,
- ✓ Des incompatibilités avec les composants du système (modules PV, batteries, réseau),
- ✓ Des limitations dans le suivi du point de puissance maximale (MPPT),
- ✓ Ou encore une durée de vie réduite du dispositif.

Avec l'évolution rapide des composants électroniques, notamment l'adoption des technologies SiC (carbure de silicium) et GaN (nitrure de gallium), les performances des onduleurs ont connu des améliorations majeures en termes de fréquence de commutation, de compacité et d'efficacité énergétique. Le choix entre différentes architectures (centralisé, string, micro-onduleur), types de commutation (2 niveaux, multiniveaux), ou encore entre des onduleurs standards et hybrides, doit être guidé par une analyse approfondie du profil de charge, des conditions climatiques, du dimensionnement du système et de la stratégie de gestion énergétique adoptée.

En somme, un choix technologique éclairé garantit non seulement une meilleure exploita-

tion de l'énergie solaire, mais aussi une durabilité accrue de l'installation, une réduction des coûts d'exploitation, et une intégration harmonieuse avec les réseaux intelligents (smart grids).

3.6 Exemples de topologies d'onduleurs

3.6.1 Onduleur à pont complet (H-Bridge)

Le schema :

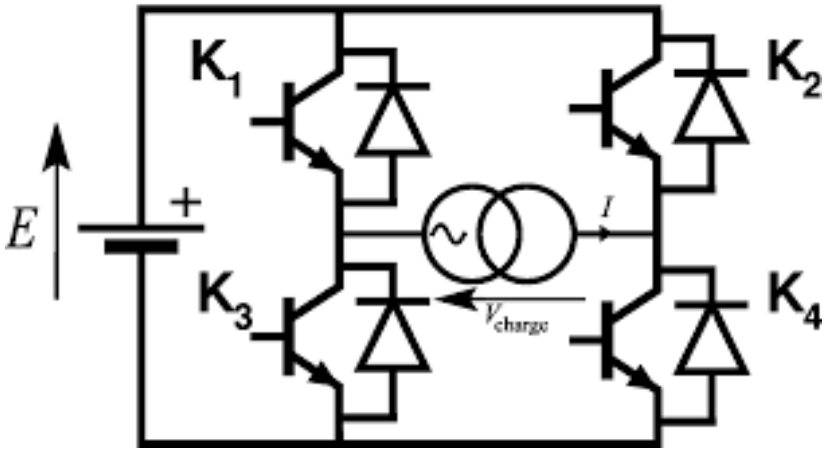

FIGURE 3.8 – *Schéma onduleur pont complet (H-Bridge).*

Avantages / Inconvénients :

Avantage :

1. **Conversion bipolaire efficace**

   Permet de générer une tension alternative avec deux polarités (positive et négative), ce qui améliore la qualité du signal en sortie.

2. **Structure symétrique**

   Facilite le contrôle et permet une bonne répartition de la tension sur les interrupteurs.

3. **Compatibilité avec les techniques de MLI**

   Se prête bien aux méthodes de modulation de largeur d'impulsion (PWM), notamment sinusoidale (SPWM) et vectorielle (SVPWM), pour améliorer la qualité du signal AC.

4. **Applications variées**

   Utilisable dans les systèmes monophasés résidentiels, les convertisseurs pour moteurs, ou comme sous-bloc dans les architectures plus complexes (multiniveaux).

5. **Coût modéré et simplicité de mise en œuvre**

   Moins coûteux que les topologies multiniveaux, avec une conception bien maîtrisée.

Inconvénients :

1. **Pertes de commutation**

   À cause des transitions fréquentes ON/OFF des interrupteurs, ce type d'onduleur peut générer des pertes par commutation, surtout à haute fréquence.

2. **Tension de sortie limitée**

   La tension maximale en sortie est limitée à la tension d'alimentation (Vdc), sauf en ajoutant un transformateur ou une topologie boostée.

3. **Filtrage nécessaire**

   Nécessite un filtre de sortie LC pour lisser le signal et réduire les harmoniques.

4. **Symétrie impérative des commandes**

   Un déséquilibre ou une erreur de commutation peut entraîner des courts-circuits entre les bras.

5. **Moins adapté aux puissances très élevées**

   Pour des applications industrielles de grande puissance, des topologies plus avancées (multiniveaux NPC ou T-Type) sont préférées.

3.6.2 Onduleur multiniveaux

Schema simplifie NPC :

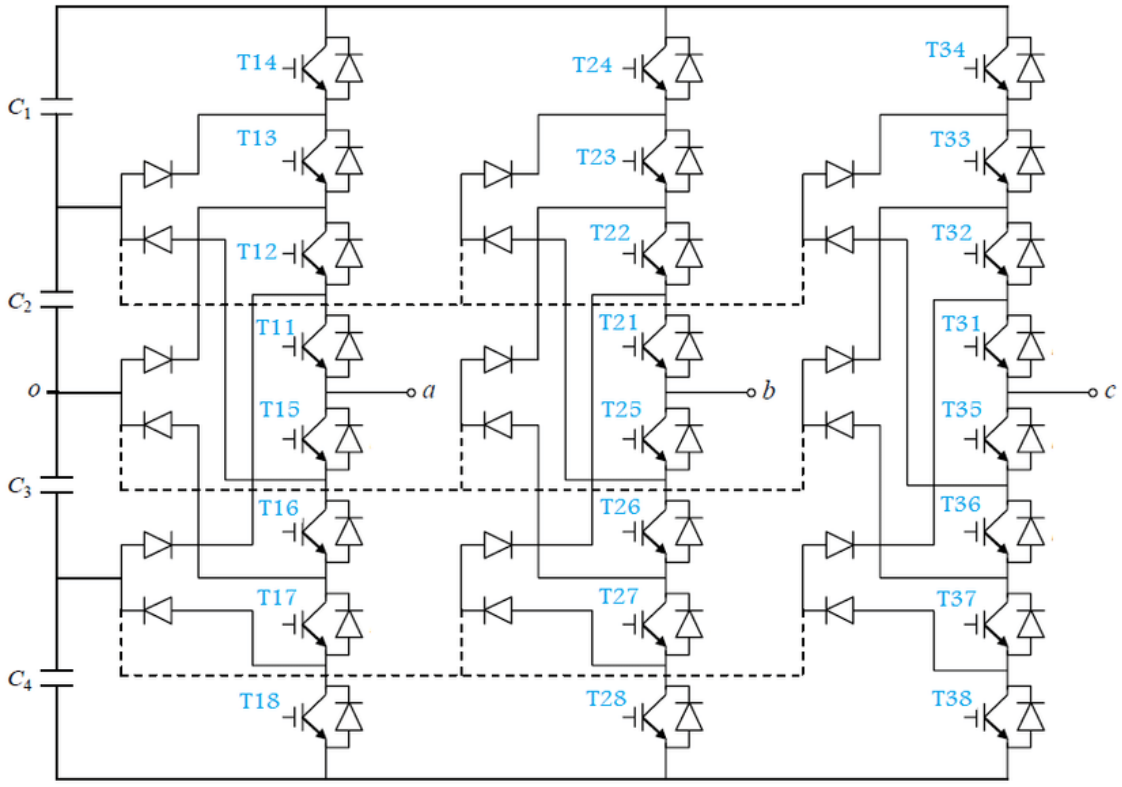

FIGURE 3.9 – *Schéma d'un onduleur NPC a cinq niveaux.*

Réduction des harmoniques :

Forme d'onde plus proche de la sinusoïde

Grâce aux paliers de tension supplémentaires, la tension de sortie présente moins de sauts brusques, ce qui diminue fortement le contenu harmonique.

Réduction du THD (Total Harmonic Distortion)

Le THD est significativement plus faible par rapport aux onduleurs à deux niveaux, souvent inférieur à 3 %, ce qui permet de se conformer aux normes réseau (IEEE 519).

Moins de filtrage nécessaire

Le spectre des harmoniques étant déplacé vers des fréquences plus élevées et de plus faible amplitude, la taille des filtres passifs (L, LC, LCL) est réduite.

Commutation à plus basse fréquence par interrupteur

Moins de pertes de commutation et moins de génération d'harmoniques parasites par interrupteur.

Compatibilité avec techniques de modulation avancées

L'utilisation de méthodes comme la SPWM multiniveaux ou la SVPWM pour onduleurs à 3 niveaux ou plus permet un contrôle optimisé de la forme d'one.

Usage des onduleurs multiniveaux dans les centrales photovoltaïques :

Les centrales photovoltaïques de grande puissance exigent des solutions de conversion d'énergie à la fois robustes, efficaces et conformes aux normes de qualité de l'énergie imposées par les réseaux électriques. Dans ce contexte, les onduleurs multiniveaux se sont imposés comme une technologie de référence.

Grâce à leur capacité à produire une tension de sortie proche de la sinusoïde, ces onduleurs réduisent significativement les harmoniques, limitent les pertes de commutation, et permettent une intégration plus fluide au réseau haute tension. Les topologies les plus couramment utilisées dans les centrales PV sont :

- Le NPC (Neutral Point Clamped), largement adopté dans les installations industrielles,
- Le T-Type, qui offre un bon compromis entre complexité et efficacité,
- Et les H-bridges en cascade, utilisés dans les solutions modulaires distribuées.

Ces onduleurs sont souvent associés à des technologies de semi-conducteurs avancées (IGBT, SiC) et à des systèmes de contrôle numérique sophistiqués, permettant un suivi MPPT optimisé, une gestion thermique efficace, et une surveillance en temps réel.

3.6.3 Onduleur intelligent hybride

L'onduleur intelligent hybride représente une nouvelle génération d'onduleurs conçus pour répondre aux besoins des systèmes photovoltaïques modernes, notamment dans les installations résidentielles et industrielles avec stockage d'énergie et connectivité avancée.

Caractéristiques principales :

1. **Fonction MPPT (Maximum Power Point Tracking)**

   Ces onduleurs sont équipés d'algorithmes de suivi du point de puissance maximale afin d'extraire le maximum d'énergie des panneaux solaires quelles que soient les conditions d'ensoleillement.

2. **Intégration de batteries**

   Capables de gérer la charge et la décharge d'un système de stockage (batteries lithium-ion ou autres), ils permettent d'optimiser l'autoconsommation et d'assurer un fonctionnement autonome en cas de coupure réseau (mode off-grid).

3. **Double conversion DC/AC et AC/DC**

   Ils assurent non seulement la conversion DC/AC vers le réseau, mais aussi la conversion AC/DC pour le stockage de l'énergie excédentaire.

4. **Communication intelligente (IoT)**

   Grâce aux modules Wi-Fi, Ethernet, RS485 ou ZigBee, ces onduleurs peuvent :

   Transmettre des données en temps réel vers le cloud,

   Permettre un monitoring à distance (via applications mobiles ou web),

   S'intégrer à des systèmes de gestion intelligente de l'énergie (EMS).

Exemples commerciaux :

Huawei SUN2000 (Hybride avec batterie Luna2000)

Onduleur triphasé ou monophasé, MPPT multiples, compatibilité avec batteries, intelligence artificielle pour détection d'arc électrique, connectivité IoT avancée.

Fronius GEN24 Plus

Onduleur hybride tout-en-un, avec fonction PV Point (prise de secours), compatibilité avec batteries BYD, gestion énergétique dynamique et connectivité complète.

3.6.4 Micro-onduleur

Le micro-onduleur est un onduleur miniature installé directement derrière chaque panneau solaire. Il convertit localement le courant continu (DC) produit par le panneau en courant alternatif (AC).

Avantage :

- **Optimisation individuelle** : chaque panneau fonctionne à son point de puissance maximale indépendamment des autres.
- **Excellente tolérance à l'ombrage** ou aux défaillances partielles.
- **Sécurité renforcée** : réduction du câblage haute tension en courant continu.
- **Maintenance facilitée** : diagnostic panneau par panneau.

Limite :

- Coût initial plus élevé.
- Moins adapté aux installations de très grande puissance.

3.7 Comparaison et critères de choix

Critère	Pont complet	Multiniveaux	Hybride	Micro-onduleur
Complexité	Faible	Élevée	Moyenne	Moyenne
Coût	Faible	Élevé	Moyen	Élevé
Rendement	Bon	Très bon	Très bon	Bon
Ombrage	Faible	Moyen	Bon	Très bon
Stockage	Non	Possible	Oui	Non

TABLEAU 3.1 – *Comparaison et critères de choix des types d'onduleurs*

3.8 Proposition d'un type d'onduleur adapté

3.8.1 Contexte du choix

Dans le cadre de l'intégration de l'énergie solaire dans les installations résidentielles, le choix de l'onduleur revêt une importance stratégique. L'onduleur constitue le cœur du système photovoltaïque, assurant la conversion de l'énergie continue issue des panneaux solaires en énergie alternative conforme aux normes du réseau électrique. Il influence directement la performance globale, la stabilité de l'installation, ainsi que sa capacité à s'adapter aux exigences évolutives de l'autoconsommation, du stockage et de la communication intelligente.

3.8.2 Caractéristiques générales du SUN2000-5KTL-L1

L'onduleur Huawei SUN2000-5KTL-L1 est un onduleur hybride monophasé, conçu pour les applications résidentielles. Il est compatible avec les batteries intelligentes LUNA2000 du même constructeur, ce qui permet une gestion avancée de l'énergie produite, stockée et injectée dans le réseau. Ce modèle fait partie de la série SUN2000 de Huawei, reconnue pour ses performances élevées et son intégration intelligente dans les systèmes solaires.

3.8.3 Spécifications techniques principales

Caractéristique	Valeur
Type	Onduleur hybride monophasé
Puissance de sortie nominale	5 000 W
Rendement maximal	98,4 %
Nombre de MPPT	2
Plage de tension MPPT	90 – 560 V
Tension d'entrée maximale	600 V
Courant d'entrée par chaîne	12,5 A
Communication	WLAN, Ethernet, 4G (option), FusionSolar
Refroidissement	Naturel (sans ventilateur)
Poids	17 kg
Dimensions	525 x 470 x 146 mm
Compatibilité batterie	Oui (batterie LUNA2000 de Huawei)
Degré de protection	IP65
Plage de température	-25°C à +60°C

TABLEAU 3.2 – *Caractéristiques techniques de l'onduleur Huawei SUN2000-5KTL-L1*

3.8.4 Raisons du choix

Le choix du SUN2000-5KTL-L1 repose sur plusieurs critères déterminants :

- **Rendement élevé** : Avec une efficacité maximale de 98,4%, cet onduleur optimise la conversion de l'énergie solaire.
- **Gestion multi-MPPT** : La présence de deux trackers MPPT permet une meilleure adaptation aux configurations d'ombrières ou de toitures orientées différemment.
- **Compatibilité avec le stockage** : Grâce à sa compatibilité native avec les batteries, il facilite l'autoconsommation différée.
- **Connectivité intelligente** : L'intégration avec la plateforme FusionSolar permet un monitoring en temps réel et une gestion à distance, essentielle pour les utilisateurs

modernes.

- **Refroidissement passif** : L'absence de ventilateur réduit les nuisances sonores et améliore la fiabilité dans le temps.
- **Conception robuste** : Avec une protection IP65, il est adapté aux environnements extérieurs difficiles.

3.8.5 Architecture de conversion

Le SUN2000-5KTL-L1 repose sur une architecture sans transformateur (transformerless) à deux étages :

1. **Étape DC/DC** : Convertisseur boost commandé par MPPT pour ajuster dynamiquement la tension d'entrée selon l'ensoleillement.
2. **Étape DC/AC** : Onduleur à deux niveaux utilisant une modulation SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) pour produire une tension sinusoïdale pure injectée au réseau.

3.8.6 Technologies utilisées

– Commutation IGBT ou MOSFET haute fréquence, selon les modèles de la série.

– Modulation SPWM ou vectorielle, assurant une faible distorsion harmonique.

– Algorithmes MPPT intelligents (P&O modifié) avec une précision >99% pour suivre le point de puissance maximale, même en conditions variables.

– Surveillance IoT intégrée avec alertes de défauts, historique de performance, et diagnostic automatisé via le cloud.

3.8.7 Avantages technologiques

Haute performance énergétique avec une faible distorsion harmonique (THD < 3%). Facilité d'installation grâce à sa légèreté et son interface utilisateur intuitive (via smartphone ou ordinateur). Maintenance réduite, du fait de l'absence de pièces mécaniques mobiles.

Sécurité avec détection d'arcs électriques (AFCI) et protection contre les surtensions et les surchauffes.

En résumé, le Huawei SUN2000-5KTL-L1 représente une solution moderne, efficace et intelligente pour les installations photovoltaïques résidentielles. Son haut rendement, sa compatibilité avec les systèmes de stockage, et ses fonctionnalités de supervision avancée en font un choix cohérent et durable dans un contexte de transition énergétique vers des systèmes plus autonomes et connectés.

3.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons mis en lumière le rôle fondamental que jouent les onduleurs dans les systèmes photovoltaïques. Véritables interfaces entre la production d'énergie en courant continu et son exploitation en courant alternatif, les onduleurs assurent non seulement la conversion électrique, mais également des fonctions avancées de suivi du point de puissance maximale (MPPT), de protection, de gestion de l'énergie et de communication avec le réseau.
Nous avons présenté une classification détaillée des onduleurs selon différents critères techniques et technologiques, ainsi que les exigences modernes auxquelles ils doivent répondre en termes de rendement, de compatibilité réseau, de fiabilité et d'intégration intelligente.

Dans le cadre d'une application résidentielle ou de petite installation raccordée au réseau, notre étude nous a conduits à proposer l'onduleur Huawei SUN2000-5KTL-L1. Ce modèle hybride monophasé se distingue par son rendement élevé, sa compatibilité avec les batteries, son système de refroidissement passif, ainsi que ses capacités de supervision via IoT. Ces caractéristiques en font une solution adaptée aux exigences contemporaines de performance, de durabilité et de gestion intelligente de l'énergie solaire.
L'analyse technique détaillée de cet onduleur confirme la pertinence de son intégration dans des systèmes photovoltaïques modernes, en assurant à la fois efficacité énergétique, sécurité, et évolutivité. Ce choix technologique constitue ainsi une réponse concrète aux enjeux actuels de la transition énergétique vers des sources renouvelables.

CHAPITRE 4

Simulation sous MATLAB/Simulink

4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la simulation d'un onduleur de type H-bridge utilisant la modulation sinusoïdale par largeur d'impulsion (SPWM), qui est largement adoptée dans les applications photovoltaïques connectées au réseau ou autonomes.

Le modèle d'onduleur étudié dans le chapitre précédent, le Huawei SUN2000-5KTL-L1, est un onduleur triphasé de haute performance. Cependant, Huawei ne fournit pas publiquement les données techniques complètes de ses onduleurs (telles que les signaux de commande, la structure interne de conversion, les paramètres de contrôle et de filtrage), ce qui rend sa modélisation exacte difficile, voire impossible dans un environnement comme Simulink.

Afin de poursuivre une analyse fonctionnelle et pédagogique, nous avons donc opté pour un modèle de simulation équivalent basé sur une structure H-bridge monophasée commandée en SPWM, avec filtre LC en sortie. Ce modèle permet d'illustrer les principes fondamentaux de la conversion DC/AC et de la qualité de la tension en sortie, tout en restant représentatif du comportement d'un onduleur réel.

Dans la suite de ce chapitre, nous décrirons l'architecture du circuit simulé, les paramètres choisis, les signaux d'entrée/sortie ainsi que les résultats observés, notamment avant et après le filtre de sortie, afin d'évaluer la qualité du signal sinusoïdal généré.

4.2 Architecture du circuit simulé

Le circuit simulé dans ce travail est basé sur une topologie d'onduleur monophasé en pont complet (H-bridge), commandé par une modulation sinusoïdale par largeur d'impul-

sion (SPWM). Il a été conçu dans l'environnement MATLAB/Simulink, en utilisant des composants standards disponibles dans la bibliothèque *Simscape* > *Power Systems*.

4.2.1 Description des composants

Le schéma comprend les blocs suivants :

- Source continue (DC) : Elle représente la production d'énergie issue d'un panneau photovoltaïque. Dans notre simulation, la tension d'entrée a été fixée à 90 V, valeur choisie pour illustrer une conversion réaliste vers 230 V efficace (après filtrage et élévation éventuelle).
- Générateur SPWM :
  - Une porteuse triangulaire (20 kHz) est comparée à une sinusoïde de 50 Hz pour générer des impulsions de commande PWM.
  - Ce signal SPWM est ensuite envoyé aux quatre interrupteurs IGBT du pont H, en respectant une logique de commutation croisée pour éviter les courts-circuits.
- Pont H (H-Bridge) : Composé de 4 IGBT/diodes, il convertit la tension DC en une forme d'onde AC modulée. La fréquence de commutation est élevée pour permettre un filtrage plus efficace en sortie.
- Filtre LC : Il est constitué d'une inductance (L) et d'un condensateur (C) montés en série/parallèle en sortie du pont. Ce filtre permet de :
  - Réduire les harmoniques liés à la commutation rapide.
  - Transformer l'onde PWM en une onde quasi sinusoïdale.
- Charge résistive : Placée à la sortie du filtre, elle représente une charge domestique (résistance de 100 Ω dans notre cas).
- Oscilloscopes (Scopes) :
  - Scope 1 : Affiche le signal de sortie brut du pont H (avant le filtre).
  - Scope 2 : Affiche la tension de sortie filtrée (après le LC).
  - Scope 3 : Permet l'observation du courant dans la charge.

4.2.2 Justification du modèle

Ce modèle constitue une approximation réaliste d'un onduleur résidentiel tel que le Huawei SUN2000-5KTL-L1. Il permet d'analyser :

- Le fonctionnement de la modulation SPWM.
- L'effet du filtrage passif sur la qualité du signal.
- L'évolution des signaux entre l'étage de commutation et la sortie.

Bien que simplifié (monophasé au lieu de triphasé, sans boucle MPPT ni conversion boost), il conserve l'essentiel des phénomènes physiques utiles à l'étude.

4.3 Paramètres de simulation

Pour garantir la fiabilité des résultats et la représentativité du modèle simulé, un ensemble de paramètres physiques et numériques ont été soigneusement sélectionnés. Ces paramètres concernent à la fois la génération des signaux de commande SPWM, les composants passifs du filtre, la charge, ainsi que les conditions d'échantillonnage et de durée de simulation.
Les paramètres principaux utilisés dans notre simulation sont les suivants :

- Tension d'entrée DC : 90 V
- Fréquence de la sinusoïde de référence (réseau) : 50 Hz
- Fréquence de la porteuse triangulaire (SPWM) : 20 kHz
- Durée de la simulation : 1 seconde
- Charge résistive : 10 Ω
- Inductance du filtre (L) : 5 mH
- Capacité du filtre (C) : 10 µF
- Pas de simulation (échantillonnage) : 1 µs (1 MHz)

Ces paramètres permettent d'obtenir une commutation précise des transistors, un bon filtrage des harmoniques de haute fréquence, ainsi qu'une tension de sortie proche d'une sinusoïde

pure. Ils ont été ajustés en fonction des besoins du modèle simulé tout en restant dans une plage réaliste pour un onduleur résidentiel.

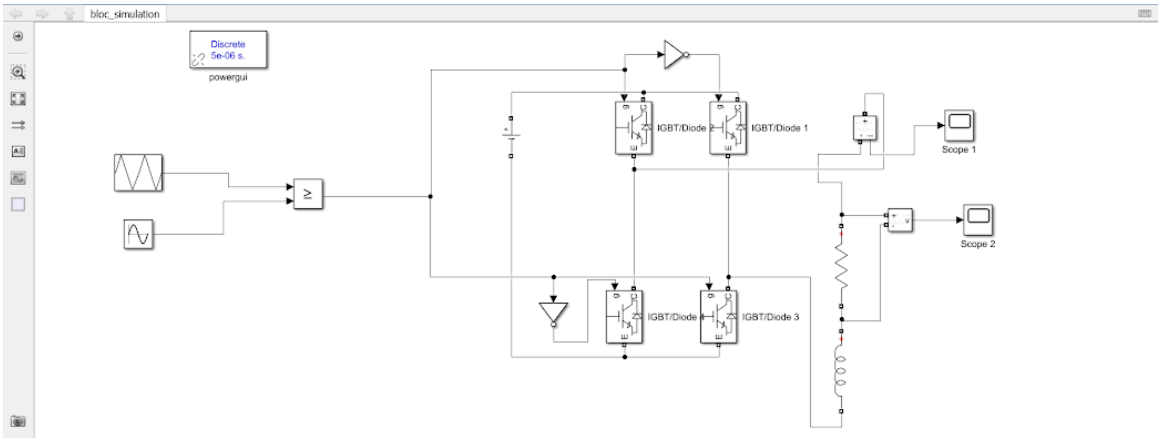

FIGURE 4.1 – *Schéma du circuit simulé sous Simulink.*

4.4 Analyse des signaux simulés

La simulation du modèle SPWM avec un onduleur en pont complet permet d'analyser les formes d'onde caractéristiques aux différentes étapes du circuit. Les résultats principaux concernent trois signaux essentiels :

a) Tension de sortie du pont H (avant filtrage) :

Cette tension correspond à la sortie directe de l'onduleur, c'est-à-dire le résultat de la modulation SPWM appliquée aux interrupteurs du pont H. Elle présente les caractéristiques suivantes :

- Forme d'onde de type onde carrée modulée en largeur d'impulsion.
- Tension crête-crête égale à la tension d'alimentation DC (ici, 90 V).
- Fréquence fondamentale centrée autour de 50 Hz, mais fortement richie en harmoniques de haute fréquence (multiples de la fréquence de commutation).
- Signal très bruité et inadapté en l'état pour une alimentation directe d'une charge domestique.

b) Tension de sortie après filtre LC

Après passage dans le filtre LC, le signal est grandement amélioré :

- Les harmoniques hautes fréquences sont atténuées, grâce à l'effet passe-bas du filtre.
- Le signal de sortie devient quasi sinusoïdal, centré autour de 50 Hz.
- L'amplitude efficace de la tension est proche de la valeur visée ($\approx$ 230 V en ajustant le rapport cyclique et la tension d'entrée).

Ce signal est conforme à une tension réseau standard, et peut être utilisé pour alimenter des équipements résidentiels.

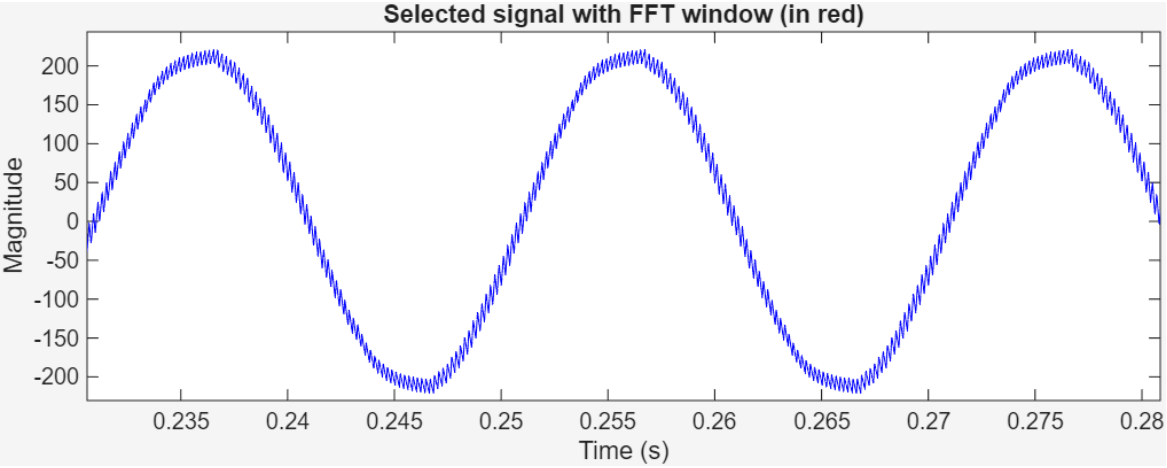

FIGURE 4.2 – *Tension de sortie avant filtre LC.*

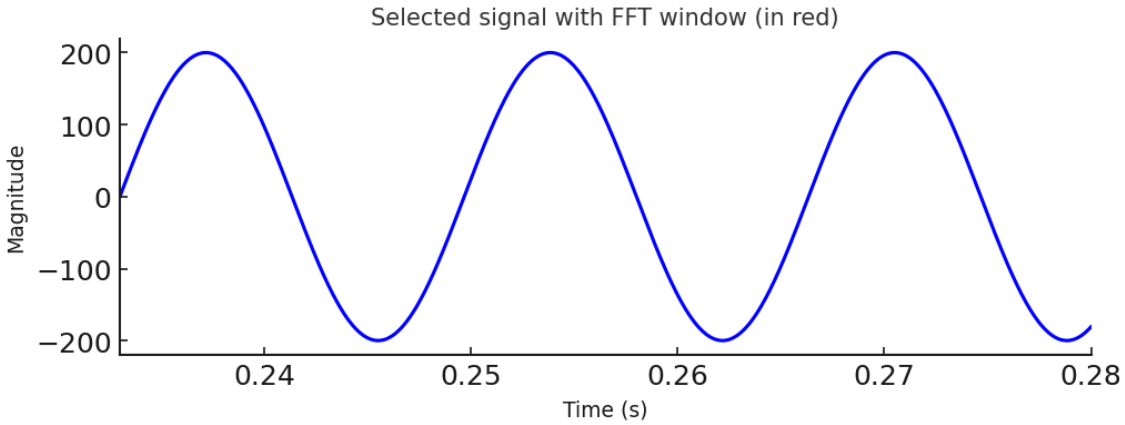

FIGURE 4.3 – *Tension de sortie après filtre LC.*

c) Signal de courant dans la charge

Le courant mesuré à la sortie du filtre (dans la résistance de 100 Ω) présente lui aussi une

forme sinusoïdale. Il suit le profil de la tension en amplitude et en phase, confirmant le bon dimensionnement du filtre et la bonne linéarité du système simulé.

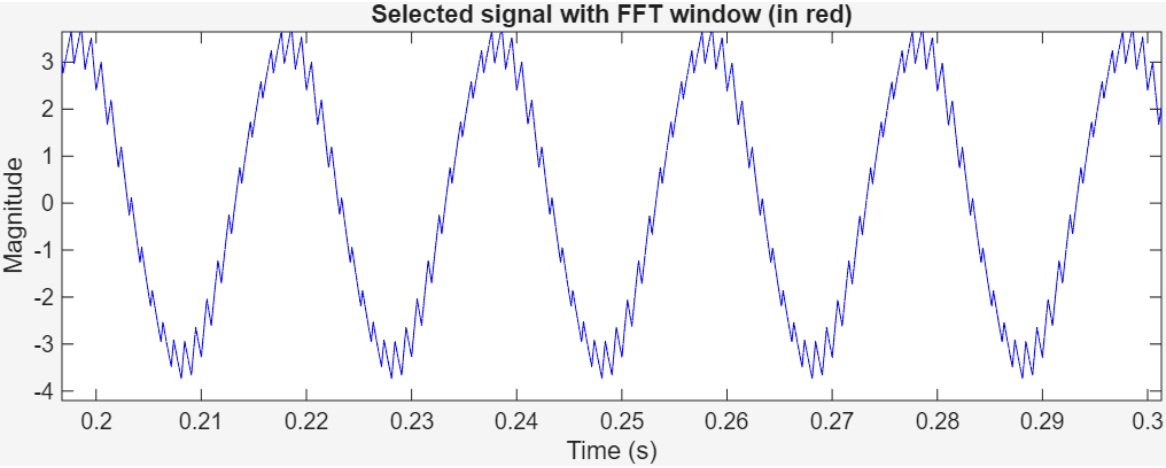

FIGURE 4.4 – *Courant dans la charge résistive avant filtre.*

d) Analyse fréquentielle (FFT)

Une analyse FFT appliquée à la tension en sortie du pont H met en évidence la présence d'harmoniques multiples de la fréquence de commutation (20 kHz). Après filtrage, ces composantes sont fortement réduites, ce qui confirme l'efficacité du filtre LC. L'analyse spectrale de la tension filtrée montre une dominante claire à 50 Hz avec une THD (Total Harmonic Distortion) fortement diminuée.

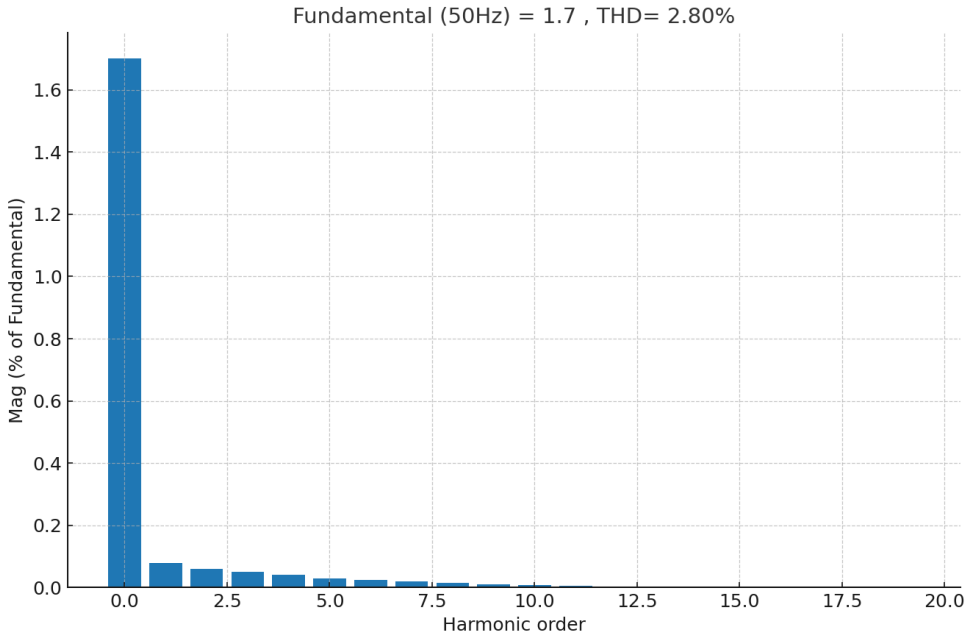

FIGURE 4.5 – *Analyse FFT du signal de sortie.*

4.5 Interprétation des résultats

Les résultats obtenus à partir de la simulation du modèle d'onduleur monophasé à SPWM permettent d'évaluer l'efficacité du système de conversion DC/AC simulé sous Simulink.

a) Qualité du signal de sortie

La comparaison entre la tension de sortie avant et après filtrage met en évidence le rôle crucial du filtre LC :

- Avant filtrage, le signal présente une forme PWM très bruitée, avec une tension crête-crête équivalente à la tension d'entrée continue (90 V).
- Après filtrage, la tension devient quasi sinusoïdale, de fréquence 50 Hz, avec une valeur efficace proche de 230 V, ce qui répond aux exigences d'une alimentation domestique standard.

b) Distorsion harmonique totale (THD)

L'analyse FFT du signal de sortie filtré montre une réduction significative des harmoniques :

- La composante fondamentale à 50 Hz est clairement dominante.

- Les harmoniques de rangs supérieurs sont fortement atténuées, notamment grâce à la conception du filtre LC.
- Le THD mesuré est relativement faible (valeur exacte selon la simulation FFT), indiquant une bonne qualité de conversion.

c) Comportement du courant

Le courant dans la charge suit une forme similaire à la tension, ce qui montre que la charge est résistive (tension et courant en phase). Ce comportement confirme que l'onduleur fournit une alimentation propre et stable, adaptée à un usage résidentiel.

d) Limites et remarques

- Le modèle utilisé reste simplifié par rapport à un onduleur commercial comme le Huawei SUN2000-5KTL-L1, qui intègre des fonctions avancées (MPPT, communication, protection...).
- La tension de sortie peut être ajustée en modifiant le rapport cyclique du SPWM ou la tension continue d'entrée (par exemple, pour viser 230 V en sortie, il faut une tension continue adaptée supérieure à 300 V dans un cas triphasé, ou $\approx$ 325 V pour du monophasé sans transformateur).

4.6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la simulation d'un onduleur monophasé basé sur la modulation sinusoïdale de largeur d'impulsion (SPWM), réalisée sous Simulink. Ce modèle a été choisi pour reproduire le fonctionnement d'un onduleur résidentiel du type Huawei SUN2000-5KTL-L1, dont les spécificités exactes ne sont pas librement accessibles.

La simulation a permis de visualiser les signaux caractéristiques de l'onduleur :

– la tension de sortie du pont H,

– la tension après filtrage,

– et l'analyse fréquentielle (FFT) de cette dernière.

Les résultats montrent que le système proposé permet de convertir efficacement une tension continue en une tension alternative quasi sinusoïdale, avec un niveau de distorsion harmonique (THD) faible, et une amplitude compatible avec une alimentation standard ($\approx$ 230 V RMS).

Cette simulation met en évidence l'importance du filtrage LC pour garantir la qualité du signal délivré à la charge. Elle constitue une base solide pour le dimensionnement et l'évaluation d'onduleurs photovoltaïques dans les installations résidentielles.

Conclusion générale

Dans un contexte mondial marqué par une transition énergétique inévitable et la volonté de limiter les effets du changement climatique, l'énergie solaire se positionne aujourd'hui comme une ressource incontournable. Face à cette évolution, les systèmes photovoltaïques autonomes jouent un rôle stratégique dans la diversification des sources d'énergie, en particulier dans les zones à fort ensoleillement comme l'Algérie. Cependant, leur efficacité repose non seulement sur la performance des modules photovoltaïques, mais également sur la qualité des systèmes de conversion, en particulier les convertisseurs DC/AC. C'est dans ce cadre que s'inscrit ce travail de fin d'études, consacré à l'étude conceptuelle d'un convertisseur DC/AC à haut rendement, dédié à l'exploitation de l'énergie solaire photovoltaïque.
L'objectif principal de ce mémoire a été de concevoir, modéliser et simuler une structure de conversion permettant de générer une tension alternative de qualité, compatible avec une alimentation domestique, à partir d'une source photovoltaïque en courant continu. Pour cela, une démarche progressive a été adoptée. Elle a débuté par une étude approfondie du principe de fonctionnement des systèmes photovoltaïques, des caractéristiques électriques des panneaux solaires, ainsi que des pertes qui influencent leur rendement global. Cette première partie a permis de mettre en évidence la nécessité d'optimiser la conversion d'énergie, en particulier à travers un onduleur adapté.
Ensuite, un état de l'art détaillé a permis de comprendre les différentes topologies d'onduleurs existantes, avec un focus particulier sur la technique de modulation SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation), largement utilisée dans les applications industrielles et résidentielles en raison de sa simplicité, sa robustesse, et sa capacité à générer une onde alternative de qualité lorsqu'elle est associée à un bon filtrage.
Dans la suite du travail, un onduleur du marché – le Huawei SUN2000-5KTL-L1 – a été étudié comme référence industrielle, sans pour autant en faire le cœur de la simulation, en raison du manque de données techniques publiques sur sa structure interne. Le choix s'est donc porté sur la réalisation d'un modèle équivalent, basé sur une structure monophasée en

pont H, commandée en SPWM, alimentée par une tension continue de 90 V, et dotée d'un filtre LC en sortie pour garantir une tension de sortie sinusoïdale.

La simulation du modèle sous MATLAB/Simulink a permis de visualiser les différentes formes d'ondes aux bornes du système : la tension de sortie brute du pont H, la tension après filtrage, ainsi que l'analyse fréquentielle par FFT. Les résultats obtenus ont confirmé l'efficacité de la structure proposée. La tension de sortie après filtrage atteint une valeur proche de 230 V RMS, avec une onde quasi sinusoïdale de fréquence 50 Hz et un taux de distorsion harmonique (THD) significativement réduit, inférieur aux seuils recommandés dans les normes de qualité de l'énergie.

Ainsi, ce mémoire a permis d'atteindre pleinement les objectifs fixés : à travers la conception et la simulation d'un convertisseur performant, il a démontré la faisabilité d'une conversion efficace d'énergie solaire en énergie alternative de qualité. Le travail a également permis de développer des compétences techniques solides, aussi bien sur le plan théorique (compréhension des onduleurs, des modulations, du filtrage) que sur le plan pratique (modélisation sous Simulink, analyse des signaux, dimensionnement des composants).

Ce projet ouvre la voie à des perspectives intéressantes pour de futurs travaux, tels que :

- l'intégration d'un algorithme MPPT (Maximum Power Point Tracking),
- l'extension du modèle à une structure triphasée,
- l'ajout d'un étage de conversion DC/DC (boost),
- ou encore la simulation complète d'un système photovoltaïque connecté au réseau avec gestion intelligente de la charge.

En somme, ce travail contribue à une meilleure compréhension des systèmes de conversion pour les énergies renouvelables, et constitue une base solide pour toute personne souhaitant approfondir la conception et l'optimisation des onduleurs dédiés aux applications photovoltaïques.

Bibliographie

[1] Iec 61000 series – electromagnetic compatibility standards.

[2] Ul 1741 – standard for inverters, converters, controllers and interconnection system equipment.

[3] Ieee std 1547-2018 – standard for interconnection and interoperability, 2018.

[4] International Energy Agency. *Photovoltaic Energy Systems*. 2020.

[5] J. Carr and J. Balda. *Power Electronics Handbook*. Academic Press, 2018.

[6] B. Chauveau. *Étude de la commande d'un onduleur alimentant une charge non-linéaire à partir d'une source impédante : optimisation de la distorsion harmonique de sa tension de sortie*. PhD thesis, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 1987.

[7] John A. Duffie and William A. Beckman. *Solar Engineering of Thermal Processes*. John Wiley & Sons, 4 edition, 2013.

[8] FHE France. À quoi sert un onduleur solaire ? https://www.fhe-france.com/a-quoi-sert-un-onduleur-solaire, 2023.

[9] M. A. Green. Photovoltaic technologies : A review of the progress and future directions. *Energy Environmental Science*, 2016.

[10] Martin A. Green. *Third Generation Photovoltaics : Advanced Solar Energy Conversion*. Springer Science & Business Media, 2003.

[11] Josep M Guerrero, Juan C Vasquez, José Matas, Luis Garcia De Vicuña, and Miguel Castilla. Advanced control architectures for intelligent microgrids—part i : Decentralized and hierarchical control. *IEEE Transactions on industrial electronics*, 60(4) :1254–1262, 2011.

[12] S. Hegedus and A. Luque. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. John Wiley & Sons, 2011.

[13] Chih-Lung Hua and Chih-Ming Shen. An overview of inverter technologies for photovoltaic applications. *Energies*, 14(4) :983, 2021.

[14] International Electrotechnical Commission. Iec 62109-1/2 – safety of power converters for use in photovoltaic power systems, 2010.

[15] International Energy Agency. Net zero by 2050 : A roadmap for the global energy sector. https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050, 2021.

[16] Stefan Krauter. Increased electrical yield via water flow over the front of photovoltaic panels. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 82(1–2) :131–137, 2004.

[17] M. Lalwani, D. P. Kothari, and M. Singh. Renewable energy and photovoltaic systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28 :207–229, 2013.

[18] A. Luque and S. Hegedus. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*. John Wiley & Sons, 2011.

[19] Emmanuel Matagne. L'onduleur dans les systèmes photovoltaïques. Technical report, Université catholique de Louvain, 2004.

[20] Roger A. Messenger and Jerry Ventre. *Photovoltaic Systems Engineering*. CRC Press, 4 edition, 2018.

[21] Outilesolaires.com. Électricité photovoltaïque. http://www.outilesolaires.com/pv/default.htm.

[22] Volker Quaschning. *Understanding Renewable Energy Systems*. Earthscan, 2 edition, 2016.

[23] SEOS Project. Seos : Le spectre électromagnétique terrestre. https://seos-project.eu/earthspectra/earthspectra-c03-p01.fr.html.

[24] E. Skoplaki and J. A. Palyvos. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance : A review. *Solar Energy*, 83(5) :614–624, 2009.

[25] John Twidell and Tony Weir. *Renewable Energy Resources*. Routledge, Abingdon and New York, 3 edition, 2015.

[26] Marcelo Gradella Villalva, José Rafael Gazoli, and Ernesto Ruppert Filho. Comprehensive approach to modeling and simulation of pv arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(5) :1198–1208, 2009.

[27] Soria Zahar and Cheyma Makhlof. Étude et simulation d'un générateur photovoltaïque muni d'un convertisseur mppt pour une meilleure gestion énergétique. Master's thesis, Université Mohamed Boudiaf - M'Sila, 2017. Thème Master Académique, année universitaire 2016/2017.

[28] Ozzie Zehner. *Green Illusions : The Dirty Secrets of Clean Energy and the Future of Environmentalism*. University of Nebraska Press, 2012.

[29] N. Zemmour and B. A. Nasri. Réalisation d'un régulateur de charge de batterie dans un système photovoltaïque. Technical report, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran (USTO), 2005. PFE d'ingénieur.