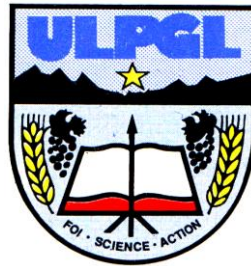


**UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS**  
**FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES**  
**APPLIQUEES**

**DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE**



BP. 368 GOMA

[www.ulpgl.net](http://www.ulpgl.net)

**Conception d'un onduleur intelligent pour  
systèmes photovoltaïques, connectés au réseau  
de distribution (Grid tie solar Inverter)**

Par BARUNGU MUMBERE DEOGRATIAS

Travail présenté en vue de l'obtention du Diplôme  
d'Ingénieur civil en génie électrique

**Option** : Génie Electrique et Informatique

**Directeur** : Prof. Dr. Ing. Olivier BARAKA  
MUSHAGE

**Encadreur** : CT. Ing. Dieudonné MUSONGYA B.

**ANNEE ACADEMIQUE 2022 - 2023**

## **Epigraphe**

« L'écologie ne devrait pas être considérée comme une contrainte, mais une opportunité de créer un monde plus sain et plus équitable »

**Ban Ki-moon**

## **Dédicaces**

Je dédie ce travail à mes parents Albert BARUNGU et NKUO Justine.

BARUNGU MUMBERE Deogratias

## Remerciements

Mes premiers mots de gratitude sont adressés à l'Éternel Dieu Tout-Puissant, Maître du temps et des circonstances.

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance envers l'Université Libre des Pays des Grands Lacs (ULPGL-Goma), en particulier envers la Faculté des Sciences et Technologies Appliquées (FSTA). À cet égard, je souhaite transmettre mes remerciements les plus sincères à l'ensemble du personnel académique, scientifique et administratif de notre chère faculté.

Ce travail n'aurait pas pu voir le jour sans l'inspiration et l'orientation précieuses que j'ai reçues. Je tiens à exprimer ma gratitude envers le Professeur Dr. BARAKA MUSHAGE Olivier, qui, malgré ses nombreuses responsabilités, a accepté de superviser ce travail. Sa guidance a renforcé ma capacité de recherche et d'adaptation. Je tiens également à remercier chaleureusement le Chef des travaux, Ir. Dieudonné MUSONGYA BISIMWA, pour ses observations pertinentes et ses conseils multiples qui ont grandement contribué à l'amélioration de ce travail.

Je souhaite adresser des remerciements spéciaux à mes parents, Albert BARUNGU et NKUO Justine, ainsi qu'à ma sœur, Arlette, et à mes frères, Toussaint, Patrick, Chadrack, Christophe, Constant, Blaise, pour leur soutien inébranlable tout au long de mon parcours. Je tiens également à exprimer ma gratitude envers tous ceux qui m'ont accompagné et soutenu de diverses manières au cours de ma formation académique, notamment MUKONDO JP, LUKAMBO Emery, ainsi que toutes les personnes dont le nom n'a pas été mentionné ici. Votre soutien et votre présence ont été d'une grande importance pour moi tout au long de cette aventure académique.

BARUNGU MUMBERE Deogratias

## Résumé

À l'heure actuelle, alors que les questions liées au réchauffement climatique et à la transition écologique suscitent de vifs débats, la production d'énergie électrique à partir de sources renouvelables décentralisées s'avère être un atout majeur dans la lutte contre le gaspillage des ressources de notre planète.

Cependant, pour intégrer efficacement ces productions d'énergie décentralisée au réseau électrique, l'utilisation d'un onduleur assisté est indispensable. Cependant, cette injection d'énergie pose des défis technologiques, notamment en ce qui concerne la synchronisation du système et les problèmes de pollution du réseau électrique. Pour garantir une intégration fluide, il est nécessaire de mettre en place un ensemble de solutions telles qu'une boucle à verrouillage de phase (PLL), des filtres et des compensateurs. Ces éléments permettent de synchroniser les signaux, d'éliminer les harmoniques indésirables et de compenser l'énergie réactive.

Pour notre expérience avec un onduleur assisté, nous avons opté pour l'utilisation d'un transformateur à point milieu alimenté en mode PUSH-PULL par deux transistors MOSFET (*Metal Oxide Silicium Field Effect Transistor*) commandés par un microcontrôleur. Ce dernier contient le programme nécessaire pour le fonctionnement du PLL et du régulateur. De plus, afin d'améliorer la connectivité et la gestion à distance, nous avons intégré un second microcontrôleur dédié à l'Internet des Objets (IoT).

**Mot clés :** Onduleur assisté, systèmes photovoltaïques, réseaux de distribution, Internet des objets

## Abstract

Climate change and ecological transition are subjects of debate of the moment, the production of electrical energy from decentralized renewable sources proves to be a breath of fresh air in the fight against the planet's resource wastage.

The use of an assisted inverter is required to inject the output from decentralized sources into the utility grid, but this injection brings technological challenges, notably in terms of synchronization and network pollution. The use of a Phase-Locked Loop (PLL), filters, and compensators is necessary to ensure synchronization, harmonics elimination, and reactive energy compensation.

To experiment with an assisted inverter, we used a center-tapped transformer powered in PUSH-PULL mode by two Metal-Oxide-Silicon Field-Effect Transistors (MOSFETs) controlled by a microcontroller containing the PLL and regulator program. Additionally, we incorporated another microcontroller for the Internet of Things (IoT) to enhance connectivity and remote management.

**Keywords:** Grid tie solar Inverter, photovoltaic systems, distribution networks, Internet of Things

## Table des matières

Epigraphe .....	i
Dédicaces .....	ii
Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Abstract .....	v
Table des matières .....	vi
Liste des abréviations, sigles et acronymes .....	x
Liste des symboles et unités des mesures .....	xii
Unités utilisées .....	xii
Symboles utilisés .....	xii
Liste des tableaux.....	xiv
Liste des figures .....	xv
0. Introduction générale .....	1
Chapitre 1 Généralités sur les systèmes photovoltaïques et les Onduleurs connecté au réseau de distribution .....	6
1.1 Introduction .....	6
1.2 L'énergie solaire.....	6
1.2.1 Spectre solaire .....	7
1.2.2 Cellule photovoltaïque .....	8

1.3	Généralités des systèmes photovoltaïques .....	10
1.3.1	Constitution des Système photovoltaïques .....	10
1.3.2	Types des systèmes photovoltaïques .....	13
1.4	Les onduleurs connectés au réseau.....	15
1.4.1	Nature d'un Onduleur .....	16
1.4.2	Fréquence et utilisation .....	16
1.4.3	Topologies des onduleurs .....	17
1.4.4	Commande des onduleurs .....	18
1.4.5	Forme de la grandeur de sortie.....	18
1.4.6	Classification des onduleurs connectés au réseau.....	19
1.5	Conclusion partielle.....	23
<b>Chapitre 2 Modélisation d'un onduleur connecté au réseau de distribution .....</b>		<b>24</b>
2.1	Introduction .....	24
2.2	Revue des méthodes de modélisation.....	24
2.2.1	Modèles moyens .....	24
2.2.2	Modélisation SSA .....	26
2.2.3	Modélisation GSSA .....	27
2.2.4	Transformation de référentiel .....	29
2.3	Choix d'une méthode de modélisation.....	30
2.4	Modèle de l'onduleur + filtre harmonique .....	31
2.4.1	Système îloté.....	33
2.4.2	Système connecté au réseau.....	36
2.5	Validation du modèle .....	37
2.6	Conclusion partielle.....	42
<b>Chapitre 3 Etude et Conception du circuit de commande d'un onduleur assisté</b>		<b>43</b>
3.1	Introduction .....	43
3.2	Le générateur SPWM .....	44

3.2.1	Principe .....	44
3.2.2	Propriétés .....	46
3.2.3	Simulation du générateur SPWM .....	47
3.3	La boucle à verrouillage de phase .....	50
3.3.1	Généralités .....	50
3.3.2	Principes.....	51
3.3.3	Choix de la Structure .....	53
3.4	La régulation .....	57
3.4.1	Généralités et principes.....	57
3.4.2	Compensation harmonique .....	59
3.5	La mise ensemble .....	60
3.6	Conclusion partielle.....	63
Chapitre 4 Développement d'un prototype d'onduleur connecté au réseau .....		64
4.1	Introduction .....	64
4.2	Schéma bloc .....	65
4.3	La commande .....	67
4.3.1	Le microcontrôleur.....	67
4.3.2	L'acquisition des données.....	67
4.3.3	Expérimentation de la commande.....	69
4.4	La partie de puissance .....	71
4.5	La communication avec l'extérieur.....	73
4.6	La mise en ensemble .....	74
4.6.1	Schéma complet .....	74
4.6.2	Coût de l'appareil.....	76
4.7	Bref aperçu de l'application .....	77
4.8	Conclusion partielle.....	78
Conclusion générale.....		80

Contributions.....	80
Critique du travail .....	81
Travaux futurs de recherche/Perspectives .....	81
Bibliographie.....	83
ANNEXES .....	a
1. Standards pour l'interconnexion de sources décentralisées au réseau utilitaire. ....	a
2. Code de l'Atmega328p .....	c
3. Code du nodeMCU .....	e
4. Photo du prototype.....	q

## Liste des abréviations, sigles et acronymes

AC	Courant alternatif, ou terme alternatif
BF	Boucle fermée
BO	Boucle ouverte
DC	Courant continu
DER	Distributed Energy Ressources – Source d'énergie décentralisée
DSP	Digital Signal Processor
FPGA	Field-Programmable Gate Array
GSSA	General State-Space Averaging
GTI	Grid Tie Inverter
HF	Haute fréquence
LF	Loop Filter
MLI	Modulation de largeur d'impulsion (identique à PWM)
MPP	Maximum Power Point – Point de puissance maximal
MPPT	Maximum Power Point Tracking – Recherche du point de puissance maximal
PD	Phase Detector – Détecteur de phase
PI	Proportionnel-Intégral
PCC	Point of Common Coupling – Nœud de raccordement commun
PLL	Phase Locked Loop – Boucle à verrouillage de phase
P-Res	Proportionnel-Résonnant
PV	Photovoltaïque
PWM	Pulse Width Modulation – Modulation de largeur d'impulsion (MLI)
SPWM	Sinus Pulse Width Modulation – MLI de type sinus
SSA	State-Space Averaging – Modèle d'état moyen
THD	Total Harmonic Distortion – Taux de Distorsion Harmonique

VCO Voltage-Controlled Oscillator

# Liste des symboles et unités des mesures

## Unités utilisées

A	Ampère
C	Coulomb
°	Degré
F	Farad
Hz	Hertz
$\Omega$	Ohm
V	Volt
VA	Volt Ampère

## Symboles utilisés

C	Condensateur du filtre LCL
d	Signal de référence du modulateur à MLI
fr	Fréquence du réseau
fs	Fréquence de commutation
i <sub>L</sub>	Courant dans l'inductance L1
i <sub>C</sub>	Courant dans la branche capacitive du filtre LCL
K <sub>inv</sub>	Gain statique du pont + modulateur
L1	Inductance du filtre LCL du côté du pont

$L_2$	Inductance du filtre LCL du côté du réseau / charge
$L_g$	Inductance de ligne
$m$	rapport de modulation
$r_c$	Résistance en série du condensateur C
$r_g$	Résistance de ligne
$R_{ch}$	Résistance de charge dans le cas d'un système îloté
$s$	Variable de Laplace
$S_{1,2,3,4}$	Interrupteurs 1, 2, 3, 4 du pont
$t$	Temps
$T$	Gain de boucle
$T_s$	Période de commutation
$T_{og}$	Fonction de transfert en boucle ouverte du système îloté (off-grid)
$T_{LCL}$	Fonction de transfert du filtre LCL
$T_{t,gt}$	Fonction de transfert de suivi en boucle ouverte du système grid-tied
$T_{d,gt}$	Fonction de transfert de perturbation du système grid-tied
$u$	Signal de commande des interrupteurs S1 et S4
$\bar{u}$	Signal de commande des interrupteurs S2 et S3
$U$	Tension aux bornes de la branche capacitive du filtre LCL
$v_a$	Tension en sortie du pont
$v_g$	Tension au PCC vs Tension du réseau
$V_{DC}$	Tension du bus DC
$V_{tri}$	Amplitude de la porteuse triangulaire du modulateur à MLI

## Liste des tableaux

Tableau 1-1 les technologies des GTI [12].	22
Tableau 4-1 Cout de l'appareils	76
Tableau 1 Résumé des standards pour l'interconnexion de DERs au réseau en conditions normales d'opération [1]	a

## Liste des figures

Figure 1.1 Spectre du rayonnement solaire [6].	7
Figure 1.2 Structure d'une cellule photovoltaïque [5].	9
Figure 1.3 Schéma bloc d'un système PV [8].	10
Figure 1.4 Champs photovoltaïque [9].	11
Figure 1.5 Symbole d'un onduleur [9].	13
Figure 1.6 Systèmes photovoltaïque connectés au réseau [5].	15
Figure 1.7 Onduleur à demi pont [1].	17
Figure 1.8 Onduleur à pont complet en H [1].	18
Figure 1.9 Classification des onduleurs connectés au réseau [12].	21
Figure 2.1 Schéma de principe de la transformation de référentiel $dq$ [1].	30
Figure 2.2 Schéma électrique du système îloté [1].	31
Figure 2.3 Schéma électrique du système connecté au réseau [1].	31
Figure 2.4 Schéma bloc du système îloté [1].	35
Figure 2.5 Schéma bloc du système connecté au réseau [1].	36
Figure 2.6 Modèle en commutation du système en boucle ouverte pour la validation du modèle	39
Figure 2.7 modèle mathématique du système en boucle ouverte	40
Figure 2.8 Validation du modèle en BO, comparaison des tensions de sortie.	41
Figure 3.1 Principe de la modulation SPWM [16].	45
Figure 3.2 Principe de SPWM bipolaire [16].	45
Figure 3.3 Principe de SPWM unipolaire [16].	46
Figure 3.4 Schéma de simulation de <i>SPWM</i>	48
Figure 3.5 Tensions de sortie <i>SPWM</i>	49
Figure 3.6 Topologie générale d'une PLL [1].	50
Figure 3.7 Structure de base des PLL [1].	51

Figure 3.8 Structure d'une PLL utilisant une génération de signal <i>In-Quadrature</i> [1] .....	52
Figure 3.9 Structure de la PLL retenue [1]. .....	54
Figure 3.10 Schéma bloc du système linéarisé [1]. .....	56
Figure 3.11 Structure d'un régulateur PI [19].....	57
Figure 3.12 Schéma de l'onduleur synchronisé au réseau et de sa commande [1].....	61
Figure 3.13 Modèle de l'onduleur synchronisé au réseau et de sa commande [1]. .....	62
Figure 4.1 Schéma bloc du prototype de l'onduleur assisté .....	66
Figure 4.2 Brochage de l'Atmega328p [7]. .....	67
Figure 4.3 Schéma du dispositif de prélèvement de la tension du réseau.....	68
Figure 4.4 Schéma du circuit de commande du prototype.....	70
Figure 4.5 Signal SPWM et échantillon du réseau .....	71
Figure 4.6 Schéma du circuit de puissance du prototype.....	72
Figure 4.7 Sinusoïde obtenue après filtrage du SPWM.....	73
Figure 4.8 schéma des éléments de communication avec l'extérieur .....	74
Figure 4.9 schéma complet du convertisseur .....	75
Figure 4.10 Capture d'écran de l'application mobile .....	78
Figure1 Photo du prototype .....	q

## 0. Introduction générale

Les sources d'énergies renouvelables ont connu un essor sans précédent durant les dernières décennies, afin de s'inscrire dans la problématique de transition énergétique. Cela amène à l'émergence de sources décentralisées (DERs) de faible puissance. Ces sources décentralisées peuvent être des systèmes photovoltaïques, des éoliennes, etc. Les DERs (*Distributed Energy Ressources*) sont le plus souvent dotées de systèmes de stockage, tels que des accumulateurs ou des volants inertiels, ce qui permet de palier à l'intermittence de la production et ainsi de pouvoir réagir à la demande selon le moment de la journée [1].

La ville de Goma, en République Démocratique du Congo, compte aujourd'hui plus d'un million quatre cents mille habitants pendant que la source d'électricité de la société étatique SNEL SA qui l'alimente n'a qu'une capacité maximale de 10MVA [2].

L'entreprise Virunga Energies SAU, qui détient les centrales hydroélectriques de Mutwanga (1,4 MW), Matebe (13,1 MW) et Luviro (14,6 MW), et qui est en train de construire la centrale de Rwanguba, fournit une puissance de 10 MW à la ville de Goma, la moitié par SOCODEE SA et l'autre moitié par Virunga Energies SAU [3].

Depuis 2020 l'entreprise Nuru SASU fournit à la ville Goma une puissance de 1,3 MW à partir de sa minicentrale solaire hybride constituée de 3888 modules photovoltaïques de 335 W chacun [4].

La RDC fait face au défi de desserte en électrique, soit 9% de desserte. Le Nord-Kivu a pour sa part une couverture de 4 % de l'électricité. Goma a 35% de desserte. Le besoin énergétique de la ville volcanique est évalué à plus ou moins 80 MW [5] .

Ce déficit en électricité fait à ce que beaucoup des ménages recourent à des sources décentralisées de faible puissance, principalement aux systèmes photovoltaïques.

Les systèmes photovoltaïques produisent beaucoup d'énergie en des moment où les utilisateurs n'en ont pas forcément besoin, pendant la journée, et ils produisent moins d'énergie au moment où les utilisateurs en ont plus besoin, le soir. Ce paradoxe nous pousse à explorer le concept des onduleurs assistés qui sont capable d'injecter au réseau de distribution le surplus d'énergie produit. Les systèmes photovoltaïques sont relativement très coûteux, les performances techniques et la fiabilité des onduleurs utilisés pour le raccordement des systèmes photovoltaïques au réseau de distribution d'électricité sont des paramètres qui peuvent très fortement faire varier la production d'énergie électrique annuelle et donc la rentabilité financière d'un système.

Ce travail tente de répondre à ces questions :

- Est-il possible de concevoir un onduleur assisté localement ? les ménages moyens de la ville de Goma sont-ils capables de se procurer cet appareil ?
- Est-ce que l'onduleur connecté aux réseaux de distribution permettra de rentabiliser le surplus en énergie ?
- Quels sont les principaux défis technologiques liés à l'efficacité énergétique de l'onduleur assisté et à la stabilité du réseau ?
- Est-ce qu'un caractère « smart » de l'onduleur assisté permettra-t-il de satisfaire les conditions de connexion au réseau de distribution ?

Aux questions ci-haut nous émettons les hypothèses suivantes :

- La conception locale d'un onduleur assisté serait possible et cet appareil serait accessible aux ménages de Goma.
- L'onduleur assisté permettrait de rentabiliser le surplus de production.

- La commande à modulation d'impulsion permettrait de maximiser l'efficacité énergétique de l'onduleur assisté. D'une part ; l'utilisation, dans la commande, d'une boucle à verrouillage de phase permettrait à l'onduleur de se synchroniser instantanément au réseau. D'autre part l'insertion d'un filtre passe bas entre l'onduleur et le réseau permettrait d'éliminer des harmoniques venues de l'onduleur.
- Un caractère « smart » de cet onduleur permettrait de satisfaire les conditions de connexion au réseau de distribution.

Cependant, l'insertion de nombreuses sources décentralisées sur le réseau entraîne un lot de problème. Les plus importants concernent la stabilité du réseau, ainsi que la qualité de l'énergie disponible au point de raccordement commun. Il est alors nécessaire de correctement concevoir les onduleurs permettant l'interfaçage électrique de la source au réseau, et surtout de correctement dimensionner sa commande. Il s'agit là de l'objectif principal de ce travail exposé ici, à savoir la conception optimale d'une stratégie de commande d'un onduleur, afin d'assurer une bonne interconnexion au réseau de distribution.

De manière spécifique nous poursuivons les objectifs suivants :

- Etudier et comprendre les principes de fonctionnement des systèmes photovoltaïques capable d'injecter de l'énergie électrique sur un réseau de distribution.
- Etablir une modélisation mathématique d'un onduleur assisté.
- Etudier les conditions de connexion d'un onduleur assisté à un réseau de distribution.
- Comprendre les stratégies de synchronisation d'un onduleurs assistés à un réseau de distribution.
- Concevoir la commande d'un onduleur assisté à partir de ses modèles mathématiques
- Expérimenter les circuits conçus à l'aide d'un microcontrôleur.

Nous sommes animés par la cause de la transition écologique, un défi mondial. La réduction du gaspillage dans la production d'énergies vertes est une contribution significative à cette cause. De plus, nous sommes motivés par l'optimisation de l'utilisation des surplus de production des systèmes photovoltaïques dans notre région, où cette pratique bénéfique n'est pas encore largement répandue.

Pour atteindre les objectifs que nous nous sommes fixés, nous avons procédé par des méthodes et techniques scientifiques :

- Technique documentaire : nous avons fait une fouille documentaire, lecture des livres, revues scientifiques, ouvrages, traitant sur le sujet pour nous enquérir de l'état de l'art des technologies des *GTI* (Grid Tie Inverter) existantes en vue d'opter pour ou de proposer une conception adéquate.
- La technique d'observation : avec la technique d'observation en situation nous avons analysé et comparé les données des simulations pour répondre à nos questions.
- Méthode Analytique : cette méthode nous a permis de modéliser l'onduleur à partir des expressions mathématiques.
- La méthode expérimentale : nous a permis de concevoir et de simuler notre système pour s'assurer de son bon fonctionnement.

Ce travail ne traite pas toutes les questions sur les onduleurs assistés encore moins sur les systèmes photovoltaïques ; il se limite à établir une approche de conception des onduleurs assistés d'une manière locale. Géographiquement, les contours de ce travail se limitent aux réalités de la ville de Goma.

La suite de ce document comporte quatre chapitres principaux suivis d'une conclusion générale dans laquelle nous faisons un bilan du travail réalisé et nous présentons quelques pistes de réflexions et perspectives pour les travaux futurs. Le chapitre premier expose les généralités sur les systèmes photovoltaïques et les onduleurs connectés au réseau. Le deuxième chapitre établit des modèles mathématiques du système en différentes configurations ; ce chapitre fournit

la base nécessaire à la conception de notre système. Les chapitres troisième et quatrième traitent respectivement de l'étude et de la conception de la commande ainsi que de la simulation et de la réalisation d'un prototype d'un onduleur assisté.

# Chapitre 1

## Généralités sur les systèmes photovoltaïques et les Onduleurs connecté au réseau de distribution

### 1.1 Introduction

La conversion de l'énergie rayonnante du soleil en énergie électrique adaptée à la consommation implique plusieurs étapes, parmi lesquelles l'utilisation d'un système photovoltaïque. Ce dernier est un système de production d'électricité à partir de l'énergie solaire, et il joue un rôle essentiel dans le processus. Plus précisément, un onduleur est l'appareil qui intervient en convertissant le courant continu généré par les panneaux solaires en courant alternatif, prêt à être utilisé par les charges à courant alternatif dans nos foyers.

Ce chapitre s'intéresse aux généralités sur l'énergie solaire, aux systèmes photovoltaïques en termes de constitution et de principe de fonctionnement et aux généralités des onduleurs connectés au réseau.

### 1.2 L'énergie solaire

L'énergie solaire est la ressource énergétique la plus abondante sur terre. Elle est à l'origine de la majorité des énergies renouvelables, mais elle est très atténuée. Le rayonnement solaire peut être utilisé pour produire soit directement de l'électricité à l'aide de semi-conducteur photovoltaïque, soit de la chaleur solaire thermique pour le chauffage ou la production électrique. L'énergie solaire se présente bien comme une alternative aux autres sources

d'énergie, elle représente un potentiel considérable. En effet, la terre reçoit plus de 3000 heures de lumière solaire par année avec un haut niveau d'éclairement. [5]

### 1.2.1 Spectre solaire

Le spectre solaire et la distribution spectrale en fonction de la longueur d'onde ( $\lambda$ ) ou de la fréquence ( $\nu$ ).

Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde qui varie entre de 0,22 à 10  $\mu\text{m}$ .

La figure 1.1 représente la variation de la répartition spectrale énergétique du rayonnement solaire.

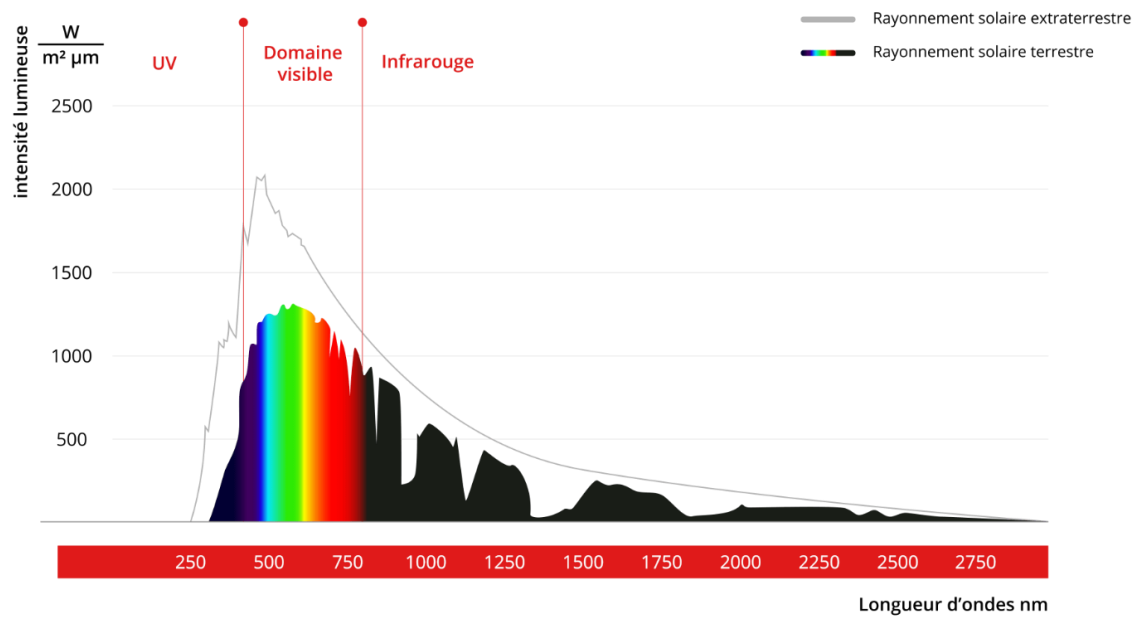


Figure 1.1 Spectre du rayonnement solaire [6].

## **1.2.2 Cellule photovoltaïque**

Une cellule photovoltaïque, ou cellule solaire, est un composant électronique qui, exposé à la lumière, produit de l'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. La puissance obtenue est proportionnelle à la puissance lumineuse incidente et dépend du rendement de la cellule. Celle-ci délivre une tension continue et un courant la traverse dès qu'elle est connectée à une charge électrique [5].

### **1.2.2.1 Structure physique**

La cellule est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Un semi-conducteur est un matériau dont la concentration en charges libres est très faible par rapport aux métaux. Pour qu'un électron lié à son atome (bande de valence) devienne libre dans un semi-conducteur et participe à la conduction du courant, il faut lui fournir une énergie minimum pour qu'il puisse atteindre les niveaux énergétiques supérieurs (bande de conduction) [5].

La cellule la plus commune d'aujourd'hui est une cellule simple au silicium de jonction PN avec un rendement qui arrive jusqu'à environ 17%. Ce matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P illustrées par la figure 1.2. Les contacts de la face éclairée de la cellule ont la structure d'une grille afin de n'occulter qu'une faible partie de la surface (5 à 10%). La face arrière peut être entièrement métallisée [5].

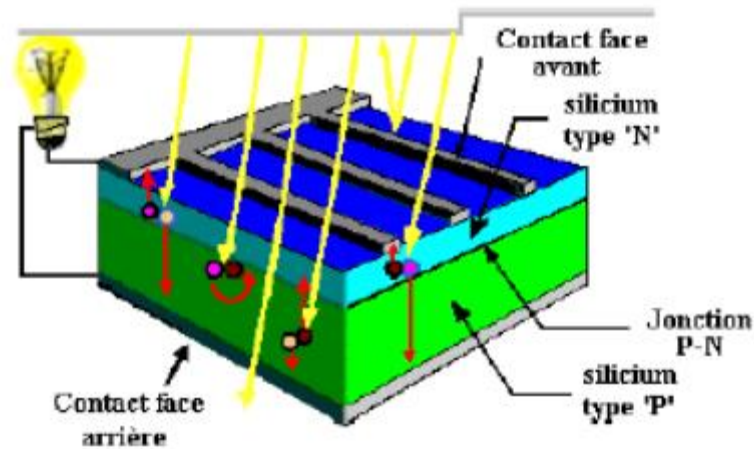


Figure 1.2 Structure d'une cellule photovoltaïque [5].

### 1.2.2.2 Principe de fonctionnement

L'effet photovoltaïque se manifeste quand un photon est absorbé dans un matériau composé de semi-conducteurs dopés P (positif) et N (négatif), dénommé comme jonction PN. Sous l'effet de ce dopage, un champ électrique est présent dans le matériau de manière permanente. Quand un photon incident (grain de lumière) interagit avec les électrons du matériau, il cède son énergie  $h\nu$  (la formule de Planck) à l'électron qui se retrouve libéré de sa bande de valence et subit donc le champ électrique intrinsèque. Sous l'effet de ce champ, l'électron migre vers la face supérieure laissant place à un trou qui migre en direction inverse. Des électrodes placées sur les faces supérieure et inférieure permettent de récolter les électrons et de leur faire réaliser un travail électrique pour rejoindre le trou de la face antérieure [7].

## 1.3 Généralités des systèmes photovoltaïques

### 1.3.1 Constitution des Système photovoltaïques

Les systèmes photovoltaïques sont constitués essentiellement d'une unité de production, d'une unité de régulation, d'une unité de stockage et d'une unité de conversion. En plus de ces éléments principaux un système PV est constitué des systèmes de raccordement, des câblages, des protections, etc.

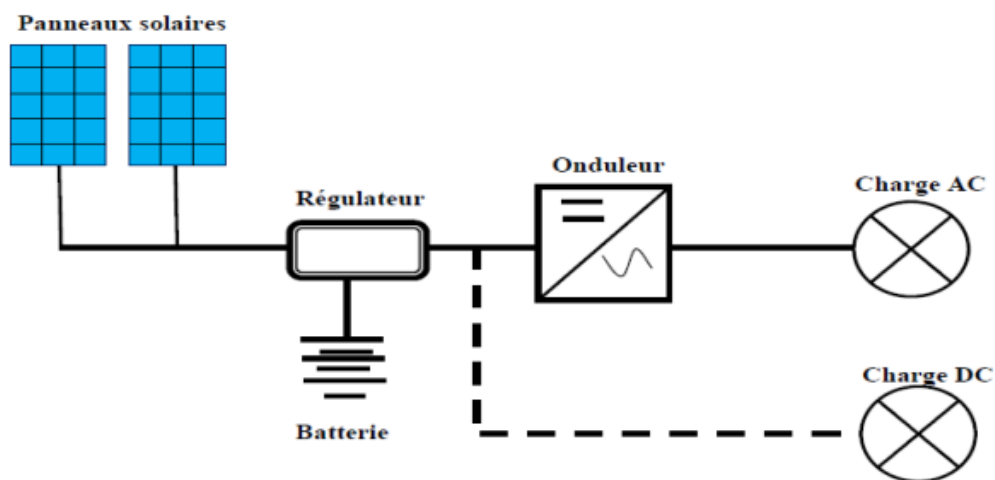


Figure 1.3 Schéma bloc d'un système PV [8].

#### 1.3.1.1 Unité de production

Le champ photovoltaïque représente l'unité de production DC d'un système. Pour obtenir des puissances de quelques kW à quelques MW, sous une tension convenable, il est nécessaire d'associer les modules en panneaux et de monter les panneaux en rangées de panneaux série et parallèle pour former ce que l'on appelle parfois une centrale.



Figure 1.4 Champs photovoltaïque [9].

### 1.3.1.2 Unité de régulation

Le régulateur de charge principalement sert avant tout à contrôler l'état de la batterie. Il existe plusieurs valeurs limites correspondant chacune à un type de protection différent : surcharge, décharge profonde, température de fonctionnement, court-circuit, etc. Les nouvelles générations de régulateurs, quant à eux, sont de plus en plus perfectionnées et proposent des fonctionnalités plus nombreuses et de plus en plus évoluées [9].

#### Le régulateur MPPT

Ce régulateur est actuellement la meilleure solution. Il contient un microprocesseur et un convertisseur statique qui permet de tirer toute l'énergie du module photovoltaïque malgré les variations de production de ces générateurs. L'idée est d'introduire un étage intermédiaire entre le module PV et la batterie qui sera constitué par le convertisseur DC-DC [10].

Les régulateurs MPPT traquent la tension  $V_{mp}$  (tension de maximum de puissance) des modules. Ils balayent une plage de tension en entrée pour déterminer constamment à quel point se trouve la puissance maximale délivrée par les modules. Le régulateur MPPT prélève la puissance à cette tension  $V_{mp}$  et la renvoie vers les batteries sous une tension plus basse, ce qui a pour effet d'augmenter le courant de charge. La puissance est égale au produit de la tension et du courant, ainsi, si la tension est réduite, le courant augmente nécessairement pour

maintenir le ratio entrée/sortie égal. Une fois la tension de la batterie arrive à sa tension maximale, le système *switche* vers une commande à tension constante, et à un courant de charge décroissant jusqu'à arriver à la pleine charge [9].

### **Le régulateur PWM**

D'autres régulateurs réalisent une commande *PWM*, le rapport cyclique variant selon l'énergie à fournir à la batterie afin de réaliser une charge à tension constante. Celui-ci est un peu plus subtil que le « tout ou rien » : Les régulateurs solaires traditionnels intégrant la technologie *PWM* relient les panneaux solaires au banc de batteries. Dans cette utilisation directe, la tension de sortie des panneaux est réduite à la tension nominale des batteries [9].

#### **1.3.1.3 Unité de stockage**

L'unité de stockage est constituée des batteries. Les accumulateurs électrochimiques sont des générateurs "réversibles" c'est-à-dire pouvant stocker de l'énergie électrique sous forme chimique puis la restituer à tout moment sur demande grâce à la réversibilité de la transformation. Dans les accumulateurs électrochimiques, il y a transfert de matière de l'électrolyte vers les électrodes et par conséquent une « usure » incontournable qui limite leur durée de vie [9].

#### **1.3.1.4 Unité de conversion.**

Les modules PV génèrent un courant continu, la consommation de l'énergie électrique est souvent en courant alternatif ce qui impose l'utilisation des onduleurs dans les systèmes PV.

L'onduleur, est un dispositif permettant de transformer en alternatif une énergie électrique de type continue. La fonction principale de ce dispositif est de créer au niveau de sa sortie une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace à partir d'une tension continue en entrée. Un onduleur est dit autonome s'il assure de lui-même sa fréquence et sa forme d'onde [9].

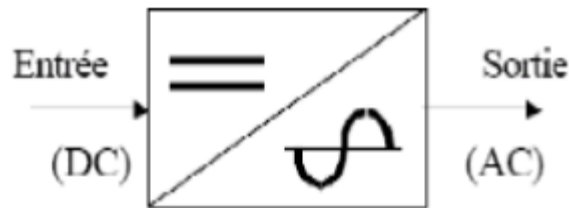


Figure 1.5 Symbole d'un onduleur [9].

## 1.3.2 Types des systèmes photovoltaïques

### 1.3.2.1 Système autonome

Les systèmes autonomes sont complètement indépendants d'autres sources d'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons, les chalets ou les camps dans les régions éloignées ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. Selon l'utilisation ou non du stockage électrochimique, les systèmes photovoltaïques autonomes sont classés comme suit [10]:

- Des systèmes photovoltaïques autonomes avec stockage.
- Des systèmes photovoltaïques sans stockage (au fil du soleil).

#### **Systèmes autonomes avec stockage**

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes, elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque au cours de la journée. Donc, le stockage électrochimique dans les batteries est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques [11].

### **Les systèmes autonomes sans stockage**

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairage solaire suffisant pour son démarrage. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont pas besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de l'éclairage solaire. Mais il faut bien dimensionner le générateur photovoltaïque de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil à l'éclairage le plus faible [11].

#### **1.3.2.2 Système PV hybride**

Les systèmes photovoltaïques hybrides intègrent un générateur photovoltaïque et un autre générateur : éolienne, groupe électrogène... et même parfois le réseau public d'électricité. En général, un système de batteries stocke l'énergie et permet ainsi de ne pas perdre l'énergie des sources aléatoires telles que le solaire ou l'éolien. La difficulté de ce type de système est d'équilibrer les différentes sources d'énergie de façon à toutes les optimiser, étant entendu que les sources thermiques (gasoil, gaz...) et le réseau public, sont toujours les appoints de dernier recours [11].

#### **1.3.2.3 Système PV raccordé au réseau**

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau, illustrés à la figure 1.3, sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. L'énergie est produite plus près des lieux de consommation. Les systèmes connectés à un réseau réduisent la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Il produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin, ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie [5].

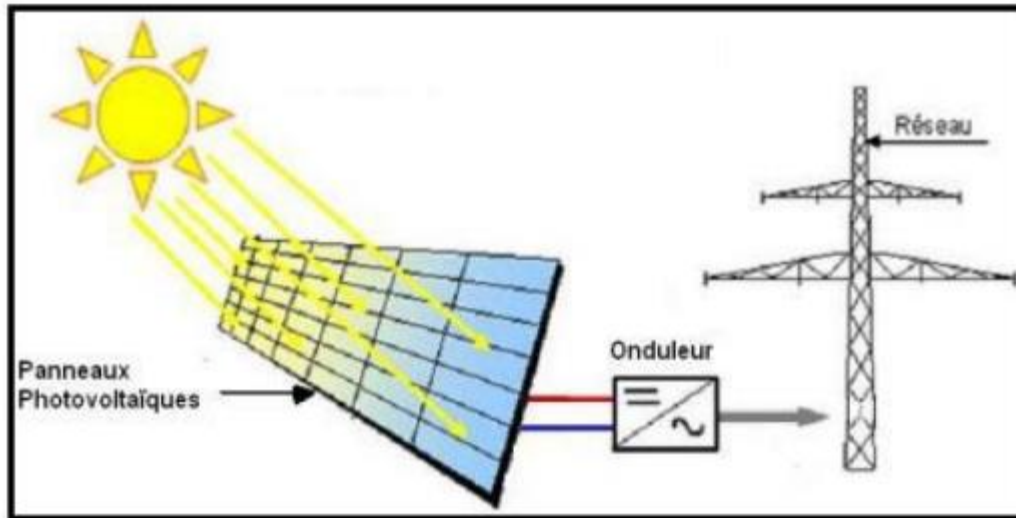


Figure 1.6 Systèmes photovoltaïque connectés au réseau [5].

## 1.4 Les onduleurs connectés au réseau

Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu/alternatif. Alimenté par une source continue, il modifie de façon périodique les connexions entre l'entrée et la sortie pour obtenir à la sortie une tension et un courant alternatif, c'est-à-dire de valeur moyenne nulle, ou un système polyphasé de telles grandeurs.

L'onduleur couplé au réseau ou le (Grid-Tie Inverter) est utilisé pour les installations photovoltaïques. Il permet de transformer le courant continu, produit par les modules solaires, en un courant ondulé conforme à celui du réseau. Il adapte également le courant produit à la fréquence et à la tension du réseau. Dans les installations d'habitation, le courant solaire produit est d'abord utilisé par l'habitation elle-même, si le courant produit pour l'habitation est excédentaire, l'excédent est injecté dans le réseau. L'installation d'un onduleur couplé au réseau électrique se fait avec l'accord de l'organisme de distributeur de d'énergie électrique. Pour des raisons de sécurité, un onduleur couplé au réseau doit constamment surveiller ces

perturbations et interrompre immédiatement l'injection en cas de défaillance ou de coupure. Ceci est absolument nécessaire pour permettre une intervention sans danger sur le réseau [12].

### **1.4.1 Nature d'un Onduleur**

La structure d'un onduleur dépend essentiellement de la nature des sources entre lesquelles il est monté. Comme il faut respecter l'alternance des sources à ses accès, on distinguera donc :

- Les onduleurs de tension reliant une source de tension continue à une source de courant alternatif,
- Les onduleurs de courant placés entre une source de courant continu et une source de tension alternative. La nature des sources est définie du point de vue des commutations.

Les onduleurs à résonance. Il s'agit d'onduleurs de tension ou de courant alimentant au voisinage de leur fréquence de résonance des circuits résonnants peu amortis. Ils servent à alimenter en moyenne fréquence des charges ayant un très faible facteur de puissance par exemple le chauffage par induction. On les utilise aussi comme convertisseurs intermédiaires dans certaines chaînes de conversion de l'énergie [13].

### **1.4.2 Fréquence et utilisation**

La fréquence des grandeurs de sortie d'un onduleur peut, suivant l'application, être fixe ou variable, être librement imposée ou peut dépendre des caractéristiques de la source alternative alimentée.

Les onduleurs de tension à fréquence fixe sont principalement utilisés :

- Pour réaliser des alimentations de sécurité délivrant une tension sinusoïdale de fréquence constante,

- Pour relier au réseau industriel des générateurs à courant continu (panneaux photovoltaïques par exemple) ou pour assurer à partir du réseau une conversion alternatif-continu (marche d'un onduleur en inverse) [13].

Les onduleurs de tension à fréquence variable servent à réaliser des entraînements à vitesse variable avec moteurs à courant alternatif.

Les onduleurs de courant sont surtout utilisés dans les entraînements à vitesse variable de moteurs à courant alternatif [13].

### 1.4.3 Topologies des onduleurs

Les onduleurs monophasés sont principalement réalisés à l'aide de deux configurations. La figure 1.7 représente la configuration à demi pont et la figure 1.8 représente la configuration à pont complet en H.

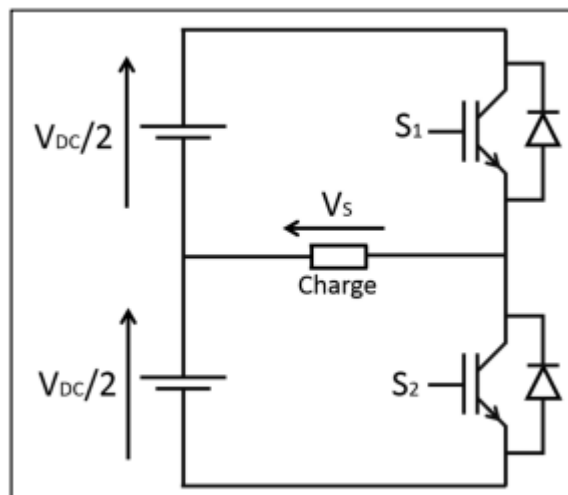


Figure 1.7 Onduleur à demi pont [1].

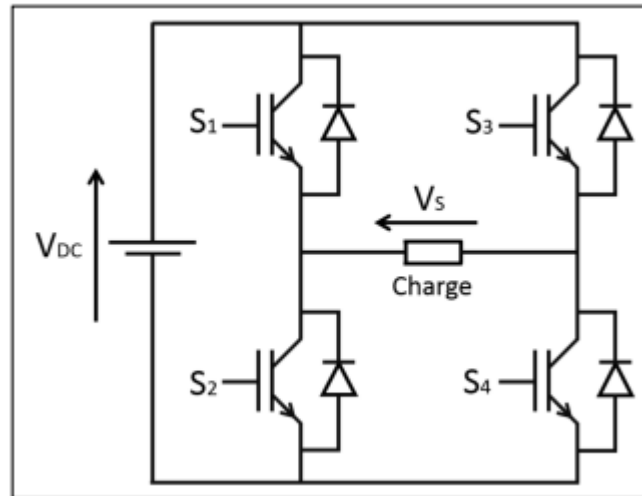


Figure 1.8 Onduleur à pont complet en H [1].

#### 1.4.4 Commande des onduleurs

En ce qui concerne la commande, il faut distinguer la nature de la grandeur de sortie (tension ou courant) dont la commande assure la régulation : un onduleur de tension peut être réglé en tension ou en courant suivant la grandeur de référence utilisée pour établir les ordres de commande des interrupteurs. De même un onduleur de courant peut être réglé en tension ou en courant.

#### 1.4.5 Forme de la grandeur de sortie

La tension ou le courant de sortie d'un onduleur de tension ou de courant peut être formé d'un seul créneau par alternance. On dit alors que l'onduleur est commandé en pleine onde. Mais, grâce aux progrès sur les semiconducteurs de puissance et sur leur commande, on utilise le plus souvent la modulation de largeur d'impulsions (MLI). Chaque alternance est formée de plusieurs créneaux dont la largeur et la position imposent les caractéristiques du spectre des grandeurs alternatives. Dans la mesure où l'on vise à produire une tension ou un courant aussi

sinusoïdal que possible, la commande MLI s'impose car elle facilite beaucoup le filtrage des grandeurs alternatives [13].

## **1.4.6 Classification des onduleurs connectés au réseau**

### **1.4.6.1 Onduleurs modulaires**

Suivant ce concept, chaque module solaire dispose d'un onduleur individuel. Pour les installations plus importantes, tous les onduleurs sont connectés en parallèle côté courant alternatif. Les onduleurs modulaires sont montés à proximité immédiate du module solaire correspondant [12]

### **1.4.6.2 Onduleurs centralisés (central inverter)**

Un onduleur centralisé de forte puissance transforme l'ensemble du courant continu produit par un champ de cellules solaires en courant alternatif. Le champ de cellules solaires est en règle générale constitué de plusieurs rangées connectées en parallèle. Chaque rangée est elle-même constituée de plusieurs modules solaires connectés en série. Pour éviter les pertes dans les câbles et obtenir un rendement élevé, on connecte le plus possible de modules en série [12]

### **1.4.6.3 Onduleurs "String" ou de rangée**

L'onduleur PV connecté en série est le plus utilisé. Le plus souvent, huit (ou plus) de modules solaires sont connectés en série. Comme une seule connexion série est nécessaire, les coûts d'installation sont réduits. Il est important de noter qu'en cas d'ombrage partiel des modules solaires, il n'y a pas de perte, l'emploi de diodes de by-pass est fortement recommandé. Les installations jusqu'à 3 Kilowatt de puissance sont fréquemment réalisées avec un onduleur String [12].

#### **1.4.6.4 Onduleurs "Multi-String" ou plusieurs rangés**

Pour une puissance plus élevée, il est possible de connecter plusieurs onduleurs String en parallèle, côté courant alternatif. L'intérêt dans ce concept est d'utiliser un plus grand nombre d'onduleurs du même type. Cela réduit les coûts de production et apporte un intérêt supplémentaire : si un onduleur tombe en panne, seule la production de la rangée concernée est défaillante [12].

#### **1.4.6.5 Avantages et utilisations des classifications des GTI**

Les branchements des différentes classifications des onduleurs connectés au réseau sont représentés à la figure 1.9. La figure illustre, de gauche à droite, respectivement les onduleurs modulaires, les onduleurs centralisés, les onduleurs de rangée, les onduleurs "Multi-String".

Le tableau 1.1 résume le type d'onduleurs adaptés suivant les paramètres de l'installation.

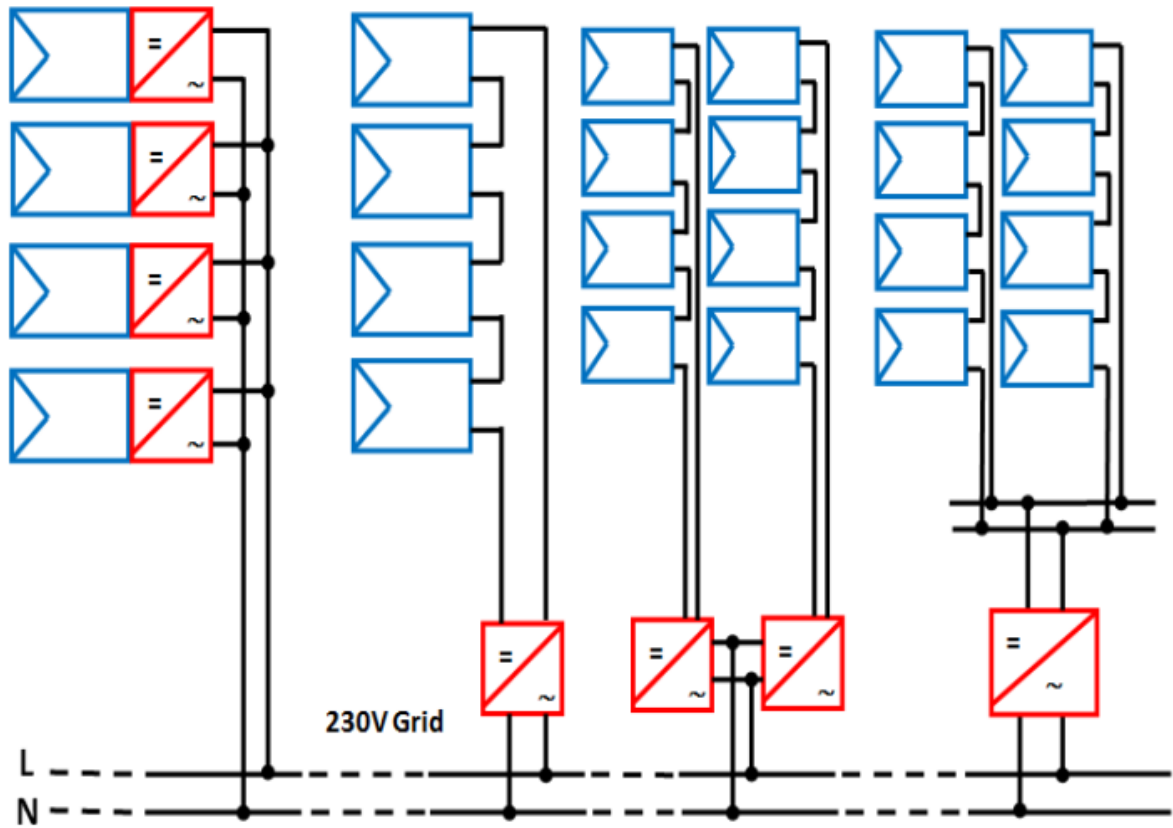


Figure 1.9 Classification des onduleurs connectés au réseau [12]

Tableau 1-1 les technologies des GTI [12].

Type	Description	Paramètres	Avantages
Onduleurs modulaires	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Branchement direct des modules sur le réseau</li> <li>-Un onduleur pour chaque module ou l'onduleur est directement installé sur le module en usine.</li> </ul>	Pour les installations de petite puissance	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pas de câblage de courant continu</li> <li>Un module ombragé n'influe pas sur le reste de l'installation</li> </ul>
Onduleurs centralisés	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Un onduleur pour la totalité du générateur PV</li> <li>-Utilisation d'un boîtier de raccordement entre le générateur et l'onduleur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Pour les montages combinant les branchement série et parallèle</li> <li>-Flux lumineux identique pour tous les modules</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Faible tolérance de puissance entre les modules</li> <li>-Possibilité de grimper de puissance de plusieurs MW</li> <li>-Installation possible de parafoudre dans le BRG</li> </ul>
Onduleurs de rangée	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Module place en série dans une rangée</li> <li>-Un Onduleur pour chaque rangée</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Flux lumineux différent entre les rangées</li> <li>-Rangée branchée au réseau via son onduleur</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-MPP Tracking personnalise pour chaque rangée</li> <li>-Adapté pour les rangées à degré d'inclinaison différent</li> </ul>

			<p>-pas besoin de BRG</p> <p>-Tolérance aux intensités différentes de luminosité entre les rangées</p> <p>-adapte aux installations de grande puissance</p>
Onduleurs "Multi-String"	<p>-Association d'onduleur centralise et « string »</p> <p>-Onduleur centralisé du côté du branchement au réseau</p> <p>-Onduleur « string » du cote du générateur</p>	<p>-Types de modules différents</p> <p>-Orientation de modules variées</p> <p>-Ombre partielle sur l'installation</p> <p>-Nombre des modules différents par rangée</p>	<p>-Meilleur rendement que pour un onduleur centralisé grâce à la possibilité MPP Tracking pour chaque rangée</p> <p>-Modularité de l'installation</p>

## 1.5 Conclusion partielle

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques généralités sur l'énergie solaire, les systèmes PV et les onduleurs connectés au réseau. Dans cette partie nous avons étudié l'énergie solaire, son spectre électromagnétique et les cellules photovoltaïques. Nous avons décrit la constitution des systèmes photovoltaïques et les caractéristiques des onduleurs.

Le chapitre suivant s'intéresse à la modélisation d'un onduleur en mode autonome et en mode connecté au réseau.

# **Chapitre 2**

## **Modélisation d'un onduleur connecté au réseau de distribution**

### **2.1 Introduction**

L'objectif de ce chapitre est de modéliser le système, en vue d'établir sa commande en boucle fermée. Le système sera modélisé par des équations et ces dernières devront représenter son comportement de manière fidèle. Cette étape est primordiale afin de faire l'analyse du système. Cela nous conduira à sélectionner une stratégie de commande en boucle fermée basée sur la modélisation effectuée, et à en régler les paramètres. Nous présenterons tout d'abord un bref état de l'art de différentes méthodes de modélisation appliquées aux convertisseurs statiques, suite à quoi nous en appliquerons une à notre système. Le modèle généré sera testé en simulation afin d'être validé. Les simulations sont réalisées dans l'environnement Matlab-Simulink.

### **2.2 Revue des méthodes de modélisation**

#### **2.2.1 Modèles moyens**

Les modèles moyens permettent une analyse du système sur une fenêtre de fonctionnement, généralement fixée à la période de commutation des convertisseurs. Le principe est d'étudier le comportement des variables caractéristiques du circuit, en les moyennant sur ladite fenêtre. Le convertisseur se comportant de la même manière sur chacun de ses périodes de commutation, nous en obtenons alors une modélisation moyenne. Il existe de nombreux types de modèles moyens, chacun ayant ses restrictions et ses particularités. Nous pouvons citer le modèle moyen grands signaux, le modèle moyen généralisé, ou encore le modèle moyen petits

signaux. Le choix, de l'un ou de l'autre des modèles, dépend du système, du mode de fonctionnement ou encore de l'objectif visé. [1]

Le modèle grand signaux, par exemple, est un modèle non linéaire, qui s'applique pour des convertisseurs DC/DC, en conduction continue. Le modèle moyen petits signaux est largement utilisé dans le domaine des convertisseurs statiques. Il s'agit d'un modèle linéaire permettant l'étude des variations des grandeurs du circuit autour de leurs valeurs moyennes, en régime permanent. Le principe est d'établir les équations des grandeurs du circuit (tension/courant) pour chacun de ses éléments passifs sur une période de commutation  $T_s$ . Cela mène alors à obtenir une expression moyennée de ces variables, en fonction des états du convertisseur décrit. Il s'agit alors d'équations non linéaires, qu'il faudra linéariser autour du point d'équilibre du convertisseur. Sont introduits maintenant les termes petits signaux, où l'on suppose que de faibles variations sont présentes autour du point d'opération de la grandeur  $x$  décrite selon la relation (2.1) [6].

$$\langle x(t) \rangle_{T_s} = \bar{x} + \tilde{x}(t) \quad (2.1)$$

Avec :  $\langle x(t) \rangle_{T_s}$  : la valeur moyennée de la grandeur  $x$  sur la période  $T_s$

$\bar{x}$ : la valeur continue de  $x$

$\tilde{x}(t)$  : l'ondulation de  $x$  autour du point d'équilibre

En introduisant ces termes petits signaux pour chacune des variables tension/courant obtenues précédemment, nous pouvons faire apparaître l'équation petit signal entre les grandeurs désirées. De là, nous pouvons alors construire le circuit équivalent du système, et ainsi étudier son comportement. D'autres méthodes, travaillant aussi sur une période de commutation du système, basent par exemple leur modèle sur le développement en série de Fourier des signaux de commutation. Afin de faire l'analyse fréquentielle du modèle petit signal, il est nécessaire de transposer le circuit équivalent dans l'espace d'état décrit à la partie suivante. [1]

En règle générale, la modélisation par petits signaux est très utile pour des topologies dans lesquelles les éléments inductifs et capacitifs sont placés « entre » les interrupteurs. Les

grandeurs de ces éléments sont « découpées » sur chaque période de commutation du circuit, d'où l'intérêt d'analyser leur évolution sur une fenêtre correspondant à cette période. Il y a alors une évolution différente de ces grandeurs en fonction de l'état de commutation des interrupteurs, et ainsi différentes évolutions sur une même période de commutation. Ce n'est pas le cas dans la topologie étudiée, où le filtre LCL voit tous ses éléments raccordés ensemble, sans être inséré dans le pont en H composé de quatre interrupteurs, et qui alimente directement le filtre en question à sa sortie. Nous pouvons alors voir ce pont comme un élément linéaire, auquel est raccordé le filtre harmonique qui a alors un comportement décrit par des équations différentielles, elles aussi linéaires. Ces équations sont alors vraies et uniques sur toute la période de commutation du système, les signaux n'étant pas découpés à proprement parler. Les modèles petits signaux sont très utiles notamment pour des convertisseurs DC/DC, où les éléments passifs sont justement insérés entre les éléments de commutation, et où cette analyse sur une période  $T_s$  prend alors tout son sens [6].

### 2.2.2 Modélisation SSA

La modélisation SSA (State-Space Averaging) décrit les variables d'état du système (tension/courant à étudier) dans un espace, dit « espace d'état ». Celui-ci permet de représenter un système d'équations différentielles à coefficients constants sous forme matricielle, comme le montre la relation (2.2) :

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= A \cdot x(t) + B \cdot u(t) \\ y(t) &= C \cdot x(t) + D \cdot u(t)\end{aligned}\tag{2.2}$$

Avec :  $x$  : les variables d'état du système, sous forme de vecteur de dimension  $n$

$\dot{x}$  : les dérivées temporelles des variables d'état (vecteur de dimension  $n$ )

$u$  : vecteur de dimension  $p$ , représentant les entrées du système

$y$  : vecteur de sortie du système, de dimension  $r$

$A$  : matrice d'état de dimension  $n \times n$

$B$  : matrice d'entrée de dimension  $n \times p$

$C$  : matrice de sortie de dimension  $r \times n$

$D$  : matrice d'anticipation de dimension  $r \times p$

Les équations du circuit étudié permettent de mettre en relation les variables d'état voulues en fonction des paramètres du système, ce qui permet, après calcul, de les exprimer dans cet espace d'état. La fonction de transfert (définie pour des conditions initiales nulles  $x(0) = 0$ ), pour un système du premier ordre à une entrée et une sortie, dans le domaine de Laplace peut ensuite être calculée selon :

$$T(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} |_{x(0)=0} = C \cdot (s.I - A)^{-1} \cdot B + D \quad (2.3)$$

Où  $I$  est la matrice identité et  $s$  est la variable de Laplace. La modélisation petit signal décrite précédemment fait appel à cet espace d'état, afin de transposer le circuit équivalent obtenu en une fonction de transfert.

### 2.2.3 Modélisation GSSA

La modélisation petit signal et la modélisation par State-Space sur laquelle cette première s'appuie, bien que performantes, sont soumises à certaines limitations, comme le fait que l'analyse des grandeurs sur une fenêtre  $Ts$  est principalement dominée par le terme DC. Cela implique que ces modèles ne peuvent pas être appliqués à tout type de convertisseur statique. Une méthode plus générale, nommée GSSA (pour Generalized State-Space Averaging), a alors été développée, et peut être appliquée pour des topologies de convertisseurs similaires à la nôtre. Cette méthode permet l'analyse de grandeurs périodiques  $x(t)$  de période  $T$  d'un système en régime permanent, approximées sur un intervalle  $[t-T; T]$  par une décomposition en série de Fourier, tel que décrit comme suit [1]:

$$x(t, s) = x(t - T + s) = \sum_k \langle x \rangle_k (t) \cdot e^{jk\omega_s(t-T+s)} \quad (2.4)$$

Où  $k$  est un entier,  $s \in [0 ; T]$ ,  $\omega_s$  est la pulsation du système et  $\langle x \rangle_k$  sont les coefficients complexes de la série de Fourier, et représentent les variables d'état du système. Ces coefficients sont déterminés par l'expression (2.5) :

$$\frac{d}{dt} \langle x \rangle_k (t) = \langle \frac{d}{dt} x \rangle_k (t) - jk \cdot \omega_s \cdot \langle x \rangle_k (t) \quad (2.5)$$

Dans le cas des convertisseurs d'électronique de puissance, les grandeurs d'états s'expriment selon (2.6) :

$$\frac{d}{dt} x(t) = f\{x(t), u(t)\} \quad (2.6)$$

Où  $u(t)$  est une grandeur périodique de période  $T$ . En combinant les équations (2.5) et (2.6), le modèle du système peut s'écrire selon (2.7).

$$\frac{d}{dt} \langle x \rangle_k = \langle f\{x, u\} \rangle_k - jk \cdot \omega_s \cdot \langle x \rangle_k (t) \quad (2.7)$$

L'analyse est alors faite en considérant la première harmonique ( $k=1$ ). Une fois le modèle d'état établi, la solution en régime permanent est calculée en posant :

$$\frac{d}{dt} \langle x \rangle_1 = 0 \quad (2.8)$$

Il est ensuite possible de linéariser le modèle autour du point d'équilibre, puis de trouver la fonction de transfert entre les grandeurs voulues. Avant d'entamer la modélisation proprement dite du convertisseur, un second sujet doit être introduit, soit la transformation de référentiel [1].

La modélisation GSSA est intéressante par le fait qu'elle soit générale, et donc applicable pour de nombreux cas de figure. La modélisation GSSA est généralement appliquée à des convertisseurs résonants, pour lesquels les variables d'état présentent un comportement oscillant prédominant [1].

### 2.2.4 Transformation de référentiel

Il est possible de transposer les variables du système dans un autre référentiel, de manière à simplifier son analyse, puis à terme son contrôle. Cela est généralement réalisé via une matrice de transformation. Nous nommerons « référentiel naturel » ou « domaine des phases » l'analyse des grandeurs temporelles du circuit sans aucune transformation. L'approche du changement de référentiel est généralement utilisée pour des systèmes triphasés, où l'on transpose les grandeurs  $abc$  du circuit dans un référentiel tournant  $dq$ . Les grandeurs  $abc$  sont alternatives, et donc variables avec le temps. En les étudiant dans un référentiel fixe (en l'occurrence le référentiel naturel), il sera plus difficile d'étudier leurs variations et donc leur comportement. Le principe de la transformation présentée ici est alors de créer un nouveau référentiel, tournant à la même vitesse que ces grandeurs alternatives (ici l'angle de ligne  $\omega t$ ). Du point de vue de ce référentiel, nous pourrions alors traiter ces grandeurs comme étant continues lorsque le système est en régime permanent. L'avantage est de pouvoir disposer de grandeurs DC et non plus alternatives, ce qui simplifie l'analyse fréquentielle et la conception des contrôleurs. Étant en régime monophasé, et ne disposant donc que d'une phase, il est impossible d'appliquer cette transformation de manière classique, comme pour les systèmes triphasés. Cependant, une transformation de grandeurs  $ab$  dans un référentiel tournant  $dq$  est tout de même possible en monophasé. Ne disposant que des valeurs  $x_a$  de la seule phase du circuit « réel », il est nécessaire de créer un circuit imaginaire  $x_b$  orthogonal à  $x_a$ , soit déphasé d'un quart de la période de ligne  $T_s$ . En disposant ainsi de deux phases  $ab$  il est possible, via la matrice de transformation  $2 \times 2$  suivantes de les transposer dans le référentiel  $dq$  [1].

$$\begin{pmatrix} x_d \\ x_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_a \\ x_b \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Le schéma de principe de cette transformation, où le référentiel  $dq$  tourne à la même vitesse que la grandeur  $\vec{x}$  à analyser est donné par la Figure 2.1.

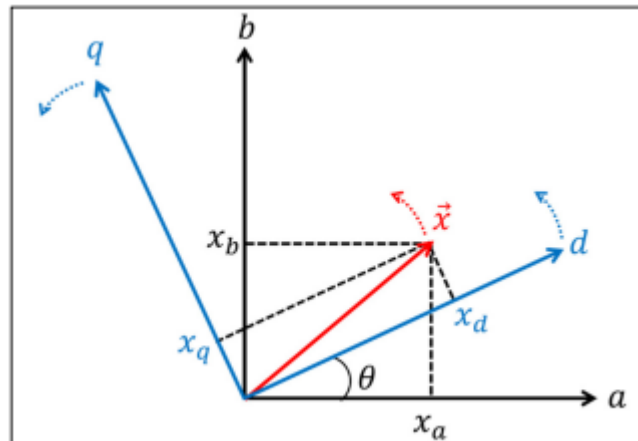


Figure 2.1 Schéma de principe de la transformation de référentiel  $dq$  [1]

La transformation de référentiel permet de traiter des grandeurs continues, et facilite la conception des contrôleurs. Cependant, cette technique nécessite de calculer une composante supplémentaire ( $x_b$ ) et introduit un délai de  $90^\circ$ . Cela se traduit par une détérioration de la réponse temporelle, et ajoute un temps de traitement supplémentaire. Il s'agit de plus d'une complexité supplémentaire.

### 2.3 Choix d'une méthode de modélisation

Les méthodes de modélisation présentées ici sont les plus répandues dans le domaine des convertisseurs statiques. La modélisation par petits signaux est adaptée aux convertisseurs dont les inductances et capacités sont placées entre les interrupteurs, ce n'est pas notre cas. La modélisation GSSA et transformation de référentiel introduisent des complexités mathématiques supplémentaires à la conception de la commande de l'onduleur. Nous préférons donc traiter les grandeurs du circuit dans le référentiel naturel. Nous nous baserons alors sur une méthode par State-Space (SSA), et sans utiliser la modélisation petit signal en amont. La modélisation effectuée pourra se mettre sous la forme d'un schéma bloc, décrivant la fonction de transfert [1].

## 2.4 Modèle de l'onduleur + filtre harmonique

Nous considérerons ici les deux cas de figure possible, à savoir un système déconnecté du réseau (off-grid), et un système y étant connecté (grid-tied), dont nous redonnons les configurations aux Figure 2.2 et Figure 2.3 respectivement.

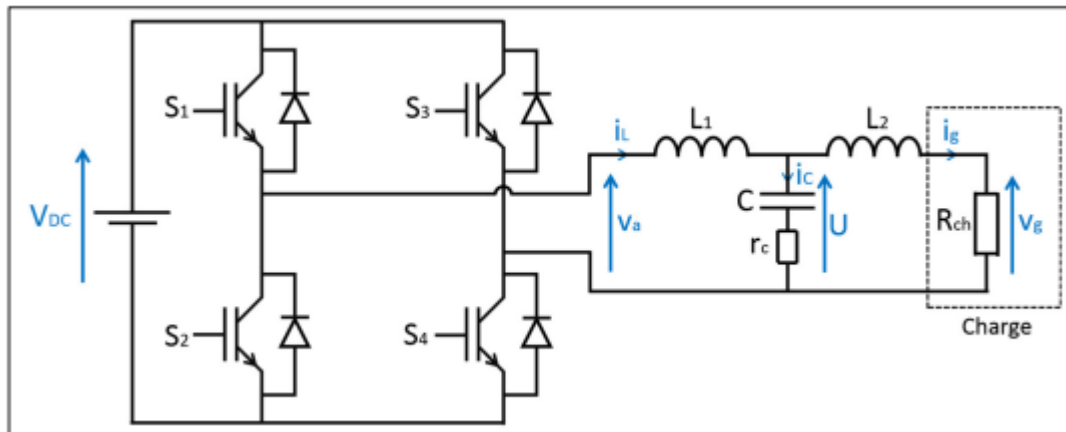


Figure 2.2 Schéma électrique du système îloté [1].

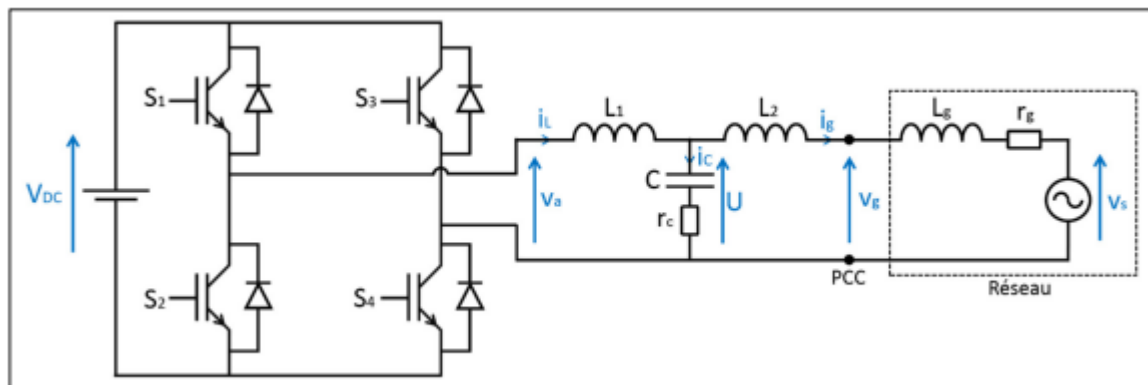


Figure 2.3 Schéma électrique du système connecté au réseau [1].

La modélisation portera sur le système physique seul en boucle ouverte (BO), sans prendre en compte sa loi de commande en boucle fermée (BF). Les fonctions de transfert du système seront

données ici pour les deux cas de figure, en vue de leur validation qui sera effectuée en fin de partie [1].

Nous cherchons ici à décrire le système physique total, soit le pont et le filtre harmonique (ainsi que les paramètres réseau dans le cas grid-tied). Tout d'abord, nous définissons une variable  $d$  correspondant au signal de référence en entrée du modulateur MLI. En boucle ouverte, ce signal est un sinus parfait. La fréquence de commutation  $f_s$  étant largement supérieure à la fréquence du réseau  $f_r$ , nous négligeons les dynamiques du pont en H, ce qui en fait un élément linéaire. Ainsi, la fonction de transfert entre la référence du modulateur MLI  $d$ , et la tension de sortie du pont  $V_a$  correspond à un simple gain  $K_{inv}$  :

$$\frac{\hat{V}_a}{\hat{d}} = K_{inv} = \frac{V_{DC}}{V_{tri}} \quad (2.10)$$

Avec :  $\hat{V}_a$  : Valeur crête de la tension de sortie du pont H

$\hat{d}$  : Valeur crête de la référence sinusoïdale

$K_{inv}$  : Gain statique du pont + modulateur

$V_{DC}$  : Tension du bus DC

$V_{tri}$  : Amplitude de la porteuse triangulaire du modulateur à MLI

Cela correspond au gain du modulateur MLI et du pont. Nous pouvons alors considérer cet ensemble comme une source de tension commandée, étant linéaire et d'impédance nulle. Une saturation existe physiquement en entrée du modulateur de limites  $\pm V_{tri}$ . Cela correspond au fait que si le signal de référence  $d$  dépasse les limites (inférieures ou supérieures) de la porteuse triangulaire d'amplitude  $V_{tri}$ , le pont se retrouvera dans une position spécifique sans commuter : il sera à l'état 2 si  $d$  dépasse la limite supérieure ( $d > V_{tri}$ ), et à l'état 3 si  $d$  dépasse la limite inférieure. Pour empêcher le blocage du pont dans une position spécifique une saturation est

ajoutée en entrée du modulateur, ses limites supérieures et inférieures étant de  $\pm 98\%$  de  $V_{tri}$ . Cela permettra à l'onduleur de continuer à commuter, dans le cas où le signal de référence dépasse la porteuse durant plusieurs périodes de commutation. Cela n'est pas censé se produire en conditions normales d'opération, mais ce cas peut survenir lors d'une faute. Cette saturation correspond à un élément non linéaire ajouté au système. Celui-ci n'est pas caractérisable avec la modélisation que l'on fait du système (production d'une fonction de transfert linéaire). Ainsi nous faisons l'hypothèse que le signal  $d$  restera hors de la plage de saturation, ce qui revient à négliger la non linéarité. Cependant, nous ferons apparaître celle-ci dans le schéma bloc produit et dans le modèle de simulation correspondant. Pour ne pas surcharger les expressions mathématiques, nous écrirons celles-ci en fonction des impédances  $Z_{L1}$ ,  $Z_{L2}$ ,  $Z_C$  et  $Z_g$  des éléments  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $C$  et du réseau, exprimées par (2.11), (2.12), (2.13) et (2.14) dans le domaine fréquentiel, où  $s$  représente la variable de Laplace [1] :

$$Z_{L1} = sL_1 \quad (2.11)$$

$$Z_{L2} = sL_2 \quad (2.12)$$

$$Z_C = \frac{1}{sC} + r_c \quad (2.13)$$

$$Z_g = sL_g + r_g \quad (2.14)$$

### 2.4.1 Système îloté

Le système se comporte ici comme une source de tension. La tension aux bornes de la charge  $v_g$  correspond alors à la sortie du modèle. Conformément à la Figure 2.2, les équations du circuit sont les suivantes :

$$v_a(t) - U(t) = L_1 \frac{di_L(t)}{dt} \quad (2.15)$$

$$U(t) - v_g(t) = L_2 \frac{di_g(t)}{dt} \quad (2.16)$$

$$i_c(t) = i_L(t) - i_g(t) = C \frac{d(U(t) - r_c i_c(t))}{dt} \quad (2.17)$$

$$v_g(t) = r_{ch} i_g(t) \quad (2.18)$$

En transposant les équations (2.15), (2.16), (2.17) et (2.18) dans le domaine de Laplace :

$$v_a(s) - U(s) = sL_1 i_L(s) \quad (2.19)$$

$$U(s) - v_g(s) = sL_2 i_g(s) \quad (2.20)$$

$$i_c(s) = i_L(s) - i_g(s) = sC(U(s) - r_c i_c(s)) \quad (2.21)$$

$$v_g(s) = r_{ch} i_g(s) \quad (2.22)$$

De là, en utilisant les notations des impédances données par (2.11), (2.12), (2.13), (2.14), nous pouvons réécrire ces expressions en vue de la construction du schéma équivalent :

$$i_L(s) = \frac{v_a(s) - U(s)}{Z_{L1}(s)} \quad (2.23)$$

$$i_g(s) = \frac{U(s) - v_g(s)}{Z_{L2}(s)} \quad (2.24)$$

$$i_c(s) = i_L(s) - i_g(s) \quad (2.25)$$

$$U(s) = Z_c(s) i_c(s) \quad (2.26)$$

$$v_g(s) = R_{ch}i_g(s) \quad (2.27)$$

Nous pouvons alors en construire le schéma bloc équivalent présenté à la Figure 2.4.

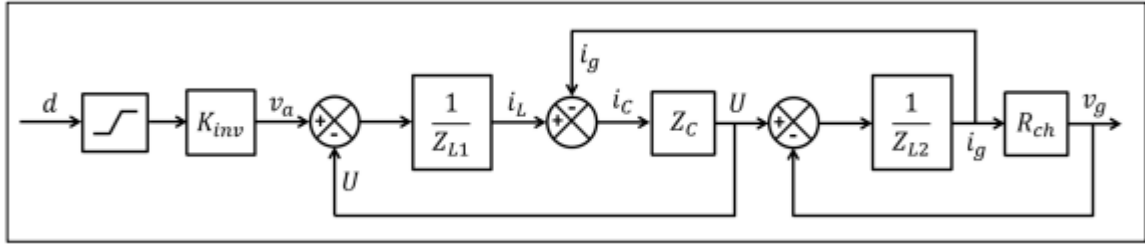


Figure 2.4 Schéma bloc du système îloté [1].

Nous pouvons finalement extraire la fonction de transfert du système en boucle ouverte (avec la notation "og" pour *off-grid*), à partir de l'équation (2.10) du pont, et des équations (2.23), (2.24), (2.25), (2.26), (2.27) du filtre LCL :

$$T_{og}(s) = \frac{v_g(s)}{d} = K_{inv} \frac{R_{ch}Z_c}{Z_cZ_{L1} + Z_cZ_{L2} + R_{ch}Z_{L1} + R_{ch}Z_c + Z_{L1}Z_{L2}} \quad (2.28)$$

Exprimée en fonction des paramètres du circuit, (2.28) se met sous la forme :

$$T_{og}(s) = \frac{V_{DC}}{V_{tri}} \frac{R_{ch}Cr_c \cdot s + R_{ch}}{CL_1L_2 \cdot s^3 + (R_{ch}CL_1 + Cr_c(L_1 + L_2)) \cdot s^2 + (R_{ch}Cr_c + L_1 + L_2) \cdot s + R_{ch}} \quad (2.29)$$

Nous faisons de plus faire apparaître la fonction de transfert du filtre LCL uniquement, sans prendre en compte la charge qui y est raccordée, en posant la tension  $v_g = 0$ . Nous exprimons alors la relation entre courant de sortie  $i_g$  et tension d'entrée  $v_a$  :

$$T_{LCL}(s) = \left. \frac{i_g(s)}{v_a(s)} \right|_{v_g=0} = \frac{Cr_c \cdot s + 1}{CL_1L_2 \cdot s^3 + Cr_c(L_1 + L_2) \cdot s^2 + (L_1 + L_2) \cdot s} \quad (2.30)$$

## 2.4.2 Système connecté au réseau

Le système se comporte dans ce cas comme une source de courant. Le courant de sortie du système  $i_g$  correspond donc à la sortie du modèle. Les équations du circuit établies précédemment sont les mêmes ici, excepté pour celle du courant  $i_g$ , qui est désormais liée aux paramètres du réseau, et non plus à la charge  $R_{ch}$ . Conformément à la Figure 2.3, nous remplaçons alors les équations (2.24) et (2.27) par l'équation (2.31) ci-après [1]:

$$i_g(s) = \frac{U(s) - v_s(s)}{Z_{L2} + Z_{Lg}} \quad (2.31)$$

Notons qu'il apparait ici le terme  $v_s$  (la tension de source) au lieu de  $v_g$ . La corrélation entre ces deux termes est la suivante :

$$v_g(s) = Z_g i_g(s) + v_s(s) \quad (2.32)$$

Le schéma équivalent du système connecté au réseau est alors illustré à la Figure 2.5.

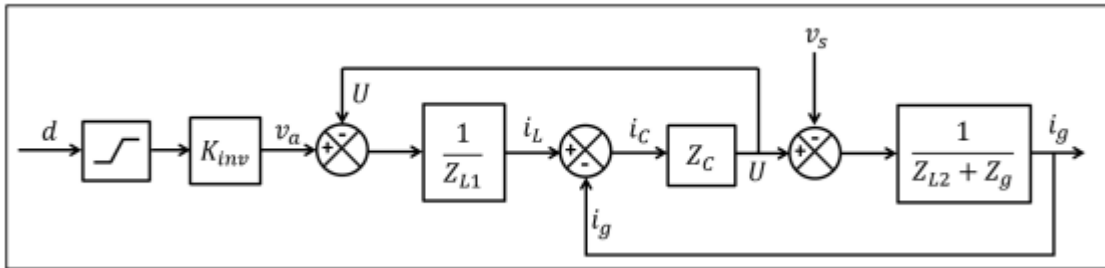


Figure 2.5 Schéma bloc du système connecté au réseau [1]

Nous pouvons voir ici la tension du réseau  $v_s$  comme une perturbation. Ainsi, une fluctuation de cette tension perturbera le système. La régulation devra donc être efficace en ce qui concerne le rejet de ces perturbations. Le courant de sortie s'exprime selon :

$$i_g(s) = \frac{Z_c K_{inv} \cdot d(s) - (Z_c + Z_{L1}) v_s(s)}{Z_c (Z_{L1} + Z_{L2} + Z_g) + Z_{L1} (Z_{L2} + Z_g)} \quad (2.33)$$

Il intervient ici la tension  $v_s$ , dans l'expression de  $i_g$ . Cela nous permet d'identifier une fonction de perturbation  $T_{d,gt}$ , et une fonction de « suivi » ou fonction de *tracking* de système  $T_{t,gt}$ . Les indices "d" et "t" intervenant dans les notations de ces fonctions correspondent à la *disturbance* (perturbation) et au *tracking* (suivi). Cette fonction de suivi se détermine pour une perturbation  $v_s = 0$ , et correspond au gain de boucle du système :

$$T_{t,gt}(s) |_{v_s=0} = \frac{i_g(s)}{d(s)} = K_{inv} \frac{Z_c}{Z_c(Z_{L1} + Z_{L2} + Z_g) + Z_{L1}(Z_{L2} + Z_g)} \quad (2.34)$$

La fonction de perturbation (*disturbance*) est donnée en posant  $d=0$ , et s'écrit :

$$T_{d,gt}(s) |_{d=0} = \frac{i_g(s)}{v_s(s)} = - \frac{Z_c + Z_{L1}}{(Z_{L1} + Z_{L2} + Z_g) + Z_{L1}(Z_{L2} + Z_g)} \quad (2.35)$$

## 2.5 Validation du modèle

Nous avons établi un modèle du système pour les deux cas de figure présentés. Il est maintenant nécessaire de s'assurer de la validité du modèle, pour pouvoir correctement concevoir la boucle fermée par la suite. Nous prendrons comme référence un modèle en commutation, qui correspond à la simulation de l'électronique de puissance en tant que telle, basé sur la librairie *SimPowerSystems* de Simulink. Nous considérerons ce modèle en commutation comme référence de base.

Nous nous assurerons de la validité du modèle pour le cas îloté, ce qui validera par la même le cas connecté au réseau. En effet, cette étude est effectuée pour l'instant en boucle ouverte, le convertisseur se comporte alors comme une source de tension. Dans le cas grid-tied, la tension au PCC (*Point of Common Coupling*) est imposée par le réseau, et le contrôle en BF du convertisseur doit être une régulation du courant de sortie. Cela ne fait pas de sens d'employer

le convertisseur comme source de tension lorsqu'il est lui-même connecté à la source de tension qu'est le réseau. Les simulations réalisées ici nous permettront de statuer si la modélisation représente correctement (et en quelles proportions) la dynamique du système, or celui-ci est identique pour les deux cas de figure considérés (même topologie et même paramètres). Ainsi donc, nous utiliserons le modèle généré pour le cas off-grid, en simulant la fonction  $T_{og}(s)$  établie (équation (2.28)). Cette validation sera effective pour les deux cas de figure, le système ayant la même dynamique.

Le modèle Simulink permettant la validation de la modélisation du système off-grid en boucle ouverte est représenté à la figure 2.6. Nous simulons ici le modèle en commutation (en haut) ainsi que le schéma bloc du système (en bas), et comparons la réponse en tension entre les deux.

Le schéma de la figure 2.6 comprends le modèle en commutation d'un onduleur associé à sa commande SPWM générée à partir de la comparaison d'un signal de référence sinusoïdal avec une porteuse triangulaire haute fréquence.

Le schéma de la figure 2.7 représente la simulation du modèle mathématique du système en boucle ouverte commandée par la référence sinusoïdale.

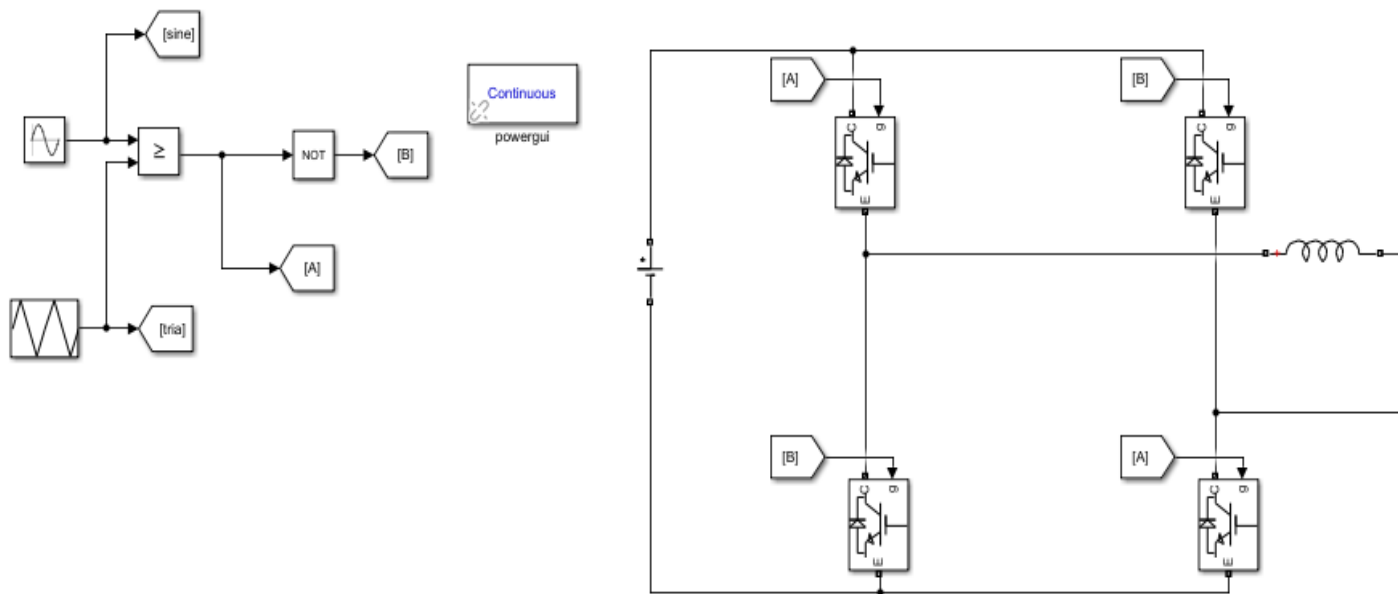


Figure 2.6 Modèle en commutation du système en boucle ouverte pour la validation du modèle

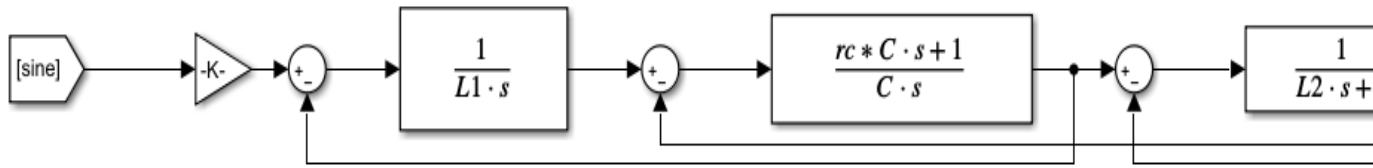


Figure 2.7 modèle mathématique du système en boucle ouverte

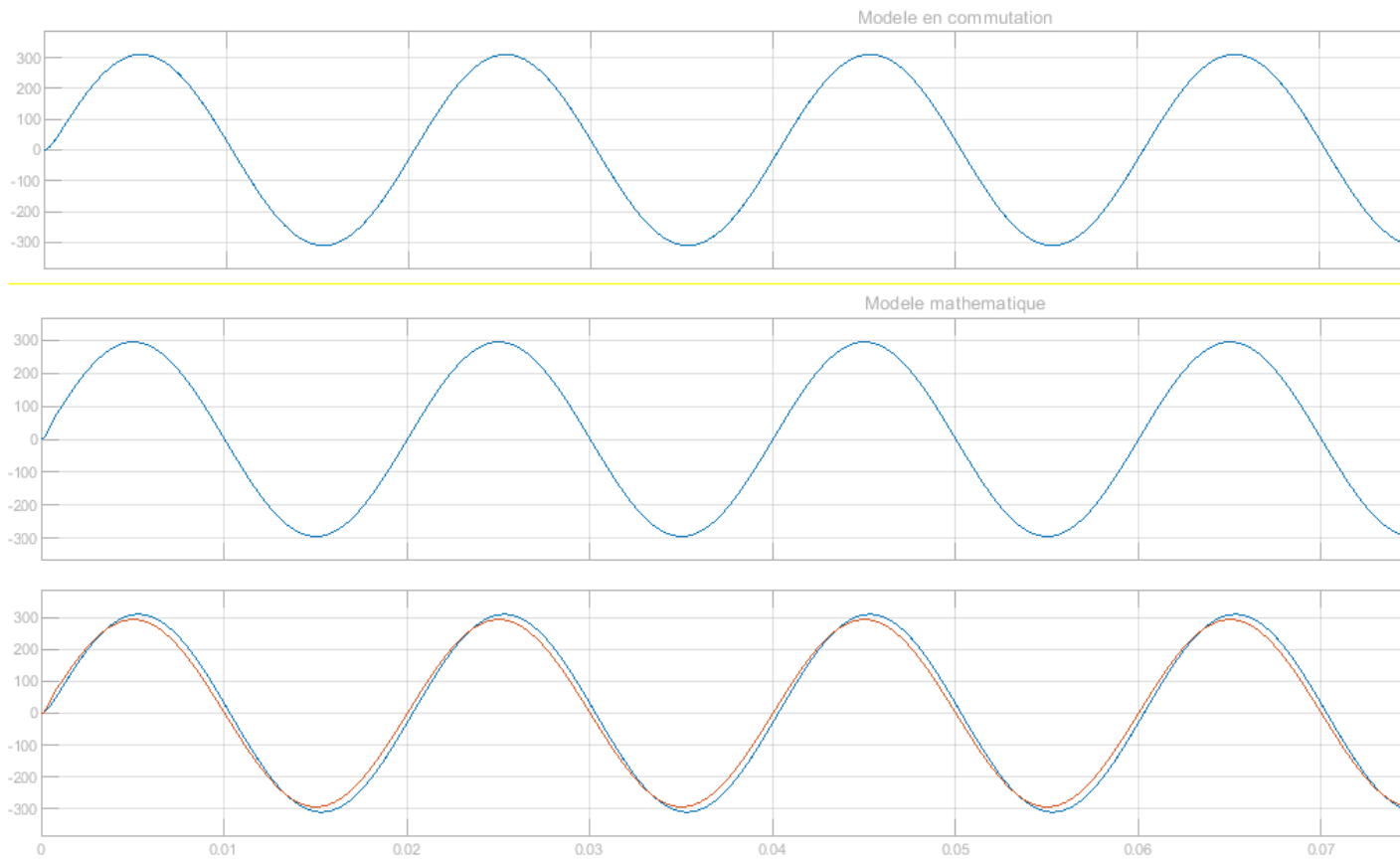


Figure 2.8 Validation du modèle en BO, comparaison des tensions de sortie

La figure 2.8 illustre les réponses en tension du modèle en commutation et celui du modèle mathématique établi dans cette partie ; nous constatons que les deux réponses en tensions coïncident (à quelques erreurs près). Ce qui prouve à suffisance que ces deux modèles sont équivalents à peu de choses à près.

## **2.6 Conclusion partielle**

Nous avons résumé ici différentes techniques de modélisation couramment appliquées aux convertisseurs statiques. Après différentes réflexions et études, nous avons opté pour une modélisation de type State-Space (SSA). Cette représentation apporte une certaine souplesse, grâce à laquelle nous pouvons travailler directement sur les termes et caractéristiques de la fonction à considérer, sans passer par un calcul matriciel. Le modèle généré a ensuite été testé et validé en simulation pour une configuration îlotée, en le comparant à un modèle en commutation, dont nous nous servons comme référence. La stabilité du système n'a pas été étudiée ici, cela sera traité dans les chapitres suivants afin de mettre en place la loi de commande. Dans le prochain chapitre nous allons travailler sur l'étude et la conception de la commande qui assurera le bon fonctionnement l'onduleur îloté et le réseau.

# Chapitre 3

## Etude et Conception du circuit de commande d'un onduleur assisté

### 3.1 Introduction

L'injection de l'énergie produit par un onduleur sur un réseau de distribution n'est pas une chose aisée. L'onduleur doit être en mesure de surveiller divers paramètres du réseau tels que l'amplitude, la fréquence et la phase, afin de reproduire la tension du réseau de manière précise, garantissant ainsi une synchronisation optimale. Les normes internationales sur l'interconnexion des sources décentralisées sur un réseau utilitaire sont reprises à l'ANNEXE1. En plus de cela l'onduleur doit être capable de s'adapter aux changements éventuels des paramètres du réseau. De ce fait, outre un générateur d'impulsion, la commande d'un onduleur assisté doit contenir un bloc qui prélève les paramètres du réseau et un autre bloc qui ajuste la cosigne du générateur d'impulsion.

L'onduleur assisté doit obligatoirement produire une onde sinusoïdale pour pouvoir se synchroniser à la tension du réseau. Le générateur d'impulsion est basé sur la modulation par largeur d'impulsion (*MLI*). La modulation en largeur d'impulsion sinusoïdale est une technique de commande des onduleurs qui facilite le filtrage du fondamental et permet de réduire considérablement les harmoniques basses fréquences de la tension de sortie de l'onduleur [15].

Les structures les plus courantes qui permettent de prélever la fréquence et l'angle d'un réseau sont des boucles à verrouillage de phase, ou PLL (Phase Locked Loop) associées à des filtres adaptatifs de Notch. L'asservissement des onduleurs assistés est couramment fait par un P-Res (Proportionnal Resonant Controller) [1].

Dans ce chapitre nous étudions et concevons les différents blocs de la commande du système, le générateurs *SPWM*, la boucle à verrouillage de phase et le régulateur proportionnel résonant. Nous prenons comme hypothèse que la tension d'alimentation de notre onduleur est constante.

## 3.2 Le générateur SPWM

### 3.2.1 Principe

La modulation de largeur d'impulsion sinus triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) avec une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire. Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante ; la fréquence de commutation des interrupteurs est fixée par la porteuse. Comme la sortie de l'onduleur de tension n'est pas purement sinusoïdale, l'intensité de courant ne l'est pas aussi, donc elle comporte des harmoniques, seuls responsables des parasites (pulsation de couple électromagnétique) ; ce qui engendre des pertes supplémentaires. Cette MLI sert à remédier ces problèmes et elle a comme avantages [16] :

- Variation de la fréquence de la tension de sortie,
- Elle repousse les harmoniques vers des fréquences plus élevées.

D'autre part, les conséquences de ces deux avantages sont :

- Minimisation de la distorsion du courant,
- Faible coût du filtre de sortie.

La modulation SPWM est basée sur la comparaison d'un signal haute fréquence triangulaire (la porteuse) et un signal de sinusoïdal référence (la modulante). Ce principe est illustré à la figure 3.1

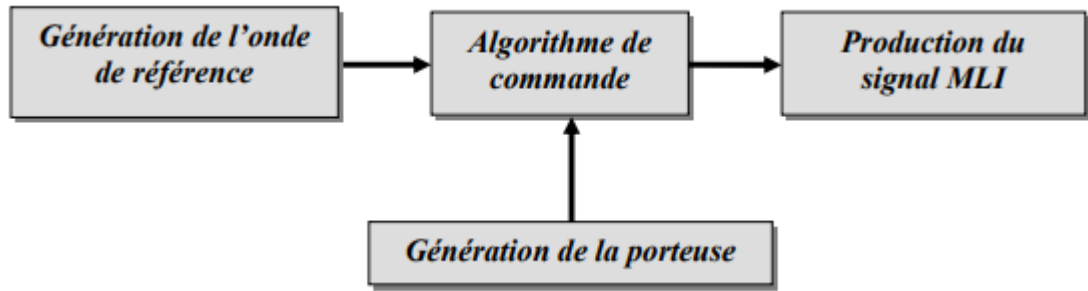


Figure 3.1 Principe de la modulation SPWM [16].

Il existe deux types de SPWM le bipolaire et unipolaire. Le SPWM bipolaire consiste à comparer une porteuse triangulaire à une référence sinusoïdale, le résultat peut prendre deux niveaux symétriques de tension comme le montre la figure 3.2. Le SPWM unipolaire consiste à comparer une porteuse triangulaire à deux références sinusoïdales (Soit deux porteuses à une référence), la tension de sortie est unipolaire à chaque alternance comme le montre la figure 3.3 [15].

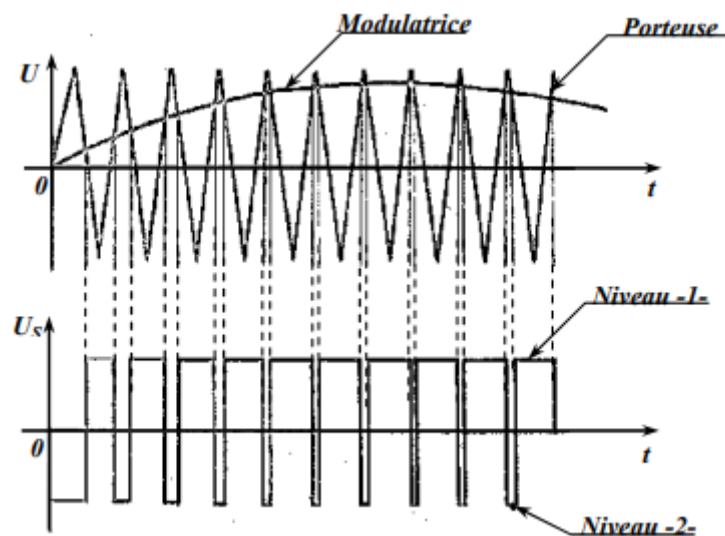


Figure 3.2 Principe de SPWM bipolaire [16].

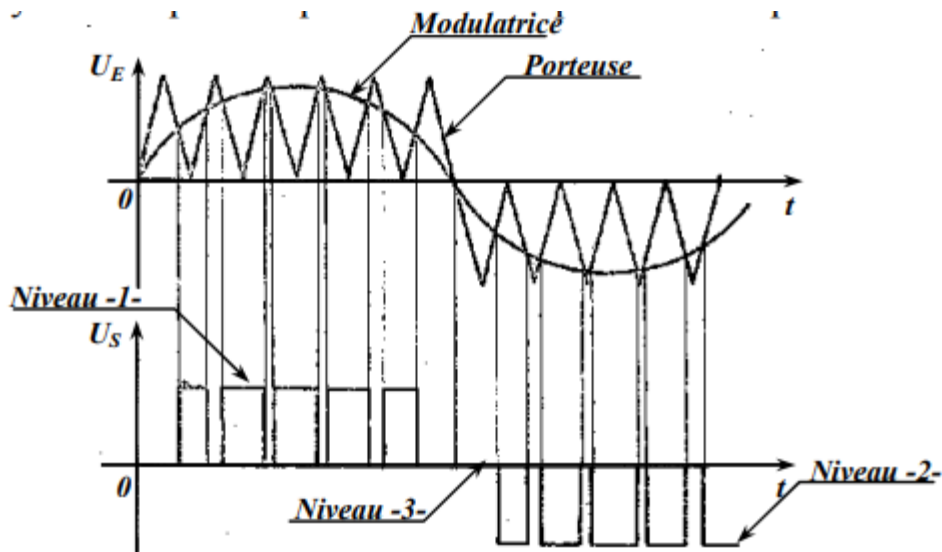


Figure 3.3 Principe de SPWM unipolaire [16].

Le SPWM bipolaire offre une réduction des harmoniques d'ordre inférieur et une réduction du taux de distorsion. Le SPWM unipolaire offre une meilleure efficacité, moins des pertes de commutation et permet une mise en œuvre facile [15].

### 3.2.2 Propriétés

Cette technique est caractérisée par deux paramètres :

- L'indice de modulation  $m$  qui est l'image du rapport de fréquences de la porteuse  $f_p$  sur la référence  $f_{ref}$

$$m = \frac{f_p}{f_{ref}} \quad (3.1)$$

- Le taux de la modulation (le coefficient de réglage en tension)  $\tau$  qui est l'image du rapport des amplitudes de tension de la référence  $d$  sur la porteuse  $V_{tri}$  :

$$\tau = \frac{d}{V_{tri}} \quad (3.2)$$

### 3.2.3 Simulation du générateur SPWM

Nous simulons le générateur *SPWM* unipolaire qui doit commander le pont H de notre onduleur sous l'environnement *Simulink* de MATLAB. Nous avons comparé un signal triangulaire à deux signaux sinusoïdaux de référence déphasés de  $180^\circ$ . Nous avons simulé avec une porteuse de 62kHz et des signaux de référence de 50Hz, le schéma de simulation est représenté à la figure 3.5.

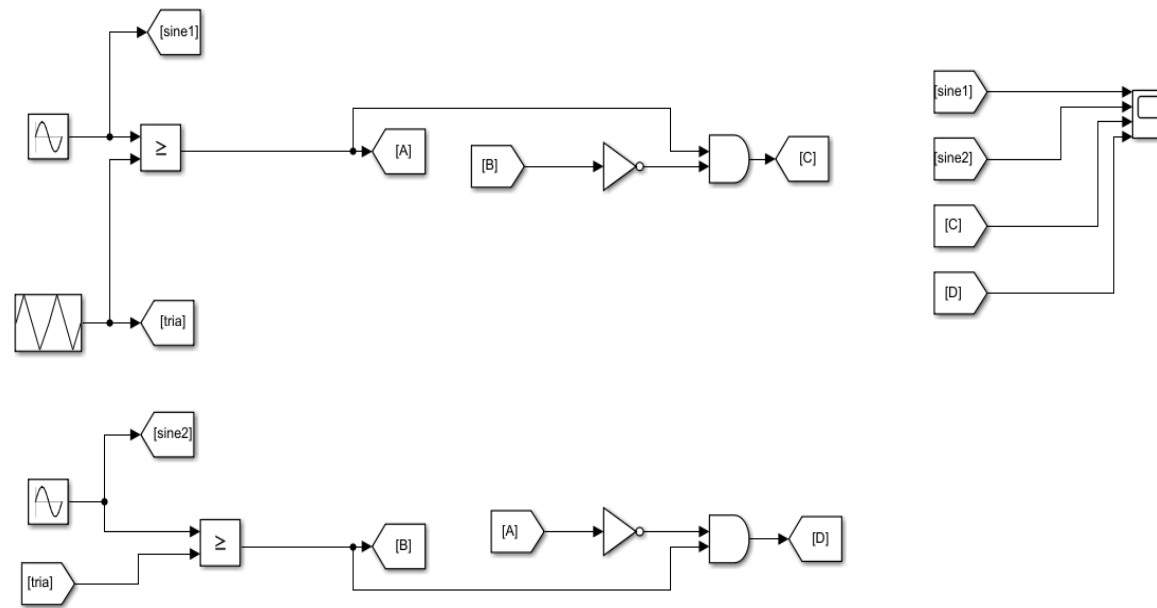


Figure 3.4 Schéma de simulation de *SPWM*

La simulation est concluante : les deux sorties SPWM simulées produisent des impulsions avec un rapport cyclique variable. Au cours d'une période du signal de référence, la première sortie est active pendant la première alternance, tandis que le deuxième reste à zéro. Lors de la deuxième alternance, la deuxième sortie devient active, tandis que le premier reste à zéro. Ce fonctionnement est illustré par la figure 3.6.

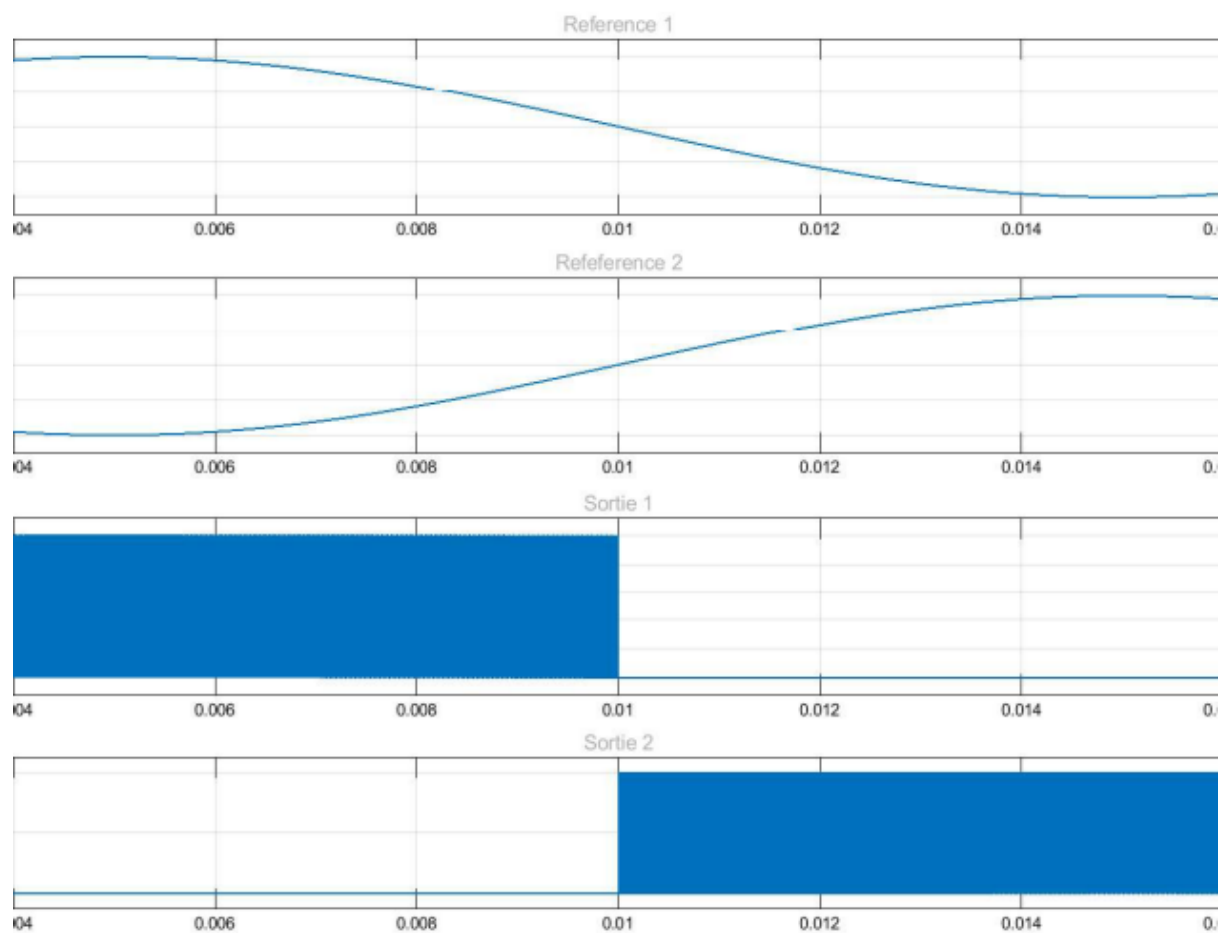


Figure 3.5 Tensions de sortie *SPWM*

### 3.3 La boucle à verrouillage de phase

#### 3.3.1 Généralités

Les boucles à verrouillage de phase (PLL en anglais pour *Phase Locked Loop*) sont des circuits très utilisés en électronique. Il s'agit donc, comme leur nom l'indique, d'un asservissement d'une phase d'un oscillateur local à celle d'un signal extérieur. Les boucles à verrouillage de phase sont au cœur de nombreux matériels électroniques : synthétiseurs de fréquence, récepteurs de télévision, téléphones cellulaires, ... [17].

L'objectif d'une PLL est de fournir l'angle et la fréquence d'un signal, ici la tension du réseau  $v(t)$ , qui correspond à la variable d'entrée du système. De manière générale, les *PLLs* sont composées de trois éléments : le détecteur de phase *PD*, le filtre de boucle *LF* et l'oscillateur commandé par la tension *VCO*. Ces éléments sont illustrés à la figure 3.7 [19].

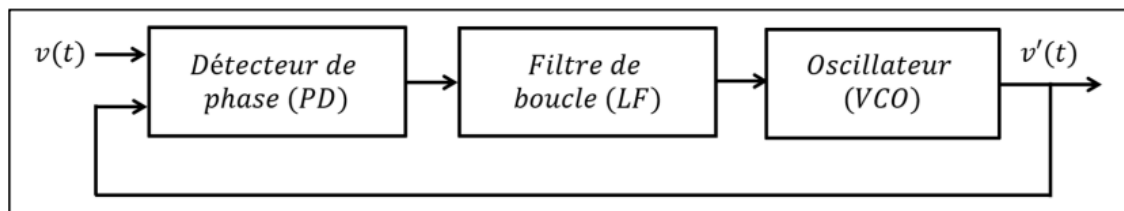


Figure 3.6 Topologie générale d'une PLL [1].

- Détecteur de phase, *PD* (Phase Detector) : génère un signal contenant l'information sur la différence de phase entre  $v(t)$  et  $v'(t)$  ;
- Filtre de boucle, *LF* (Loop Filter) : généralement un correcteur de type *PI*. Il permet de fournir un filtrage passe-bas afin de supprimer la composante haute fréquence de sortie

du détecteur de phase. Il corrige de plus l'erreur de phase entre  $v(t)$  et  $v'(t)$ , c'est-à-dire l'erreur entre la phase du réseau et la phase estimée par la PLL ;

- Oscillateur, VCO (Voltage-Controlled Oscillator) : calcule la pulsation et l'angle estimés de  $v(t)$  à partir d'une pulsation centrale  $\omega_c$ . Fournit à sa sortie un signal AC ( $v'(t)$ ) créé à partir de l'angle estimé de  $v(t)$ . Si les éléments de la PLL sont correctement dimensionnés, l'angle estimé correspond à l'angle « réel » de  $v(t)$  en régime permanent.

### 3.3.2 Principes

La figure 3.7, qui représente la configuration globale des PLLs, expose un problème lié à une composante à double fréquence du réseau (que nous désignerons par "composante HF") présente dans le signal de sortie du bloc PD, et qui n'est pas suffisamment filtrée par le bloc LF. Pour pallier à problème, de nombreuses structures de PLLs ont été conçues.

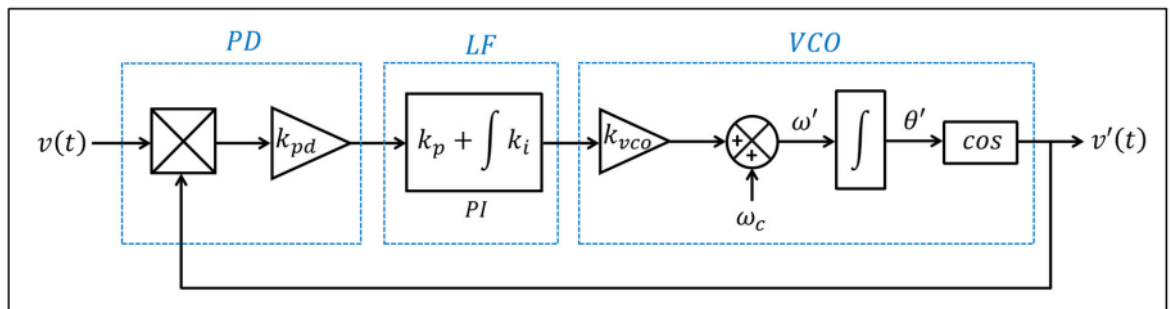


Figure 3.7 Structure de base des PLL [1].

Avec :

- $v(t)$  : Tension du réseau
- $v'(t)$  : Tension estimée par la PLL
- $k_{pd}$  : Gain du détecteur de phase de la PLL

- $k_p$  : Gain proportionnel d'un compensateur PI
- $k_i$  : Gain intégral d'un compensateur PI
- $k_{VCO}$  : Gain de l'oscillateur de la PLL
- $\theta'$  : Angle estimé par la PLL
- $\omega'$  : Pulsation estimée par la PLL
- $\omega_c$  : Pulsation centrale de la PLL

Les structures de PLL les plus courantes se basent sur une génération de signal *In-Quadrature* dans le bloc PD, afin de s'affranchir des composantes indésirables à sa sortie. Cela consiste à générer un signal orthogonal à  $v(t)$ , ce qui correspond à une transformation de référentiel, permettant alors de supprimer la composante HF en sortie du bloc PD. Cela permet aussi de traiter des grandeurs DC pour le dimensionnement du système. Le schéma de principe d'une telle structure est présenté à la Figure 3.9 [1].

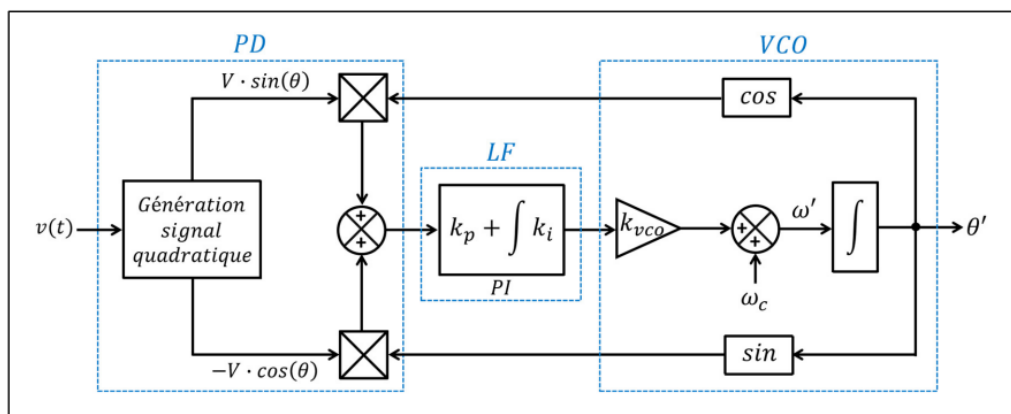


Figure 3.8 Structure d'une PLL utilisant une génération de signal *In-Quadrature* [1]

De nombreux types de PLL se basant sur ce principe existent. La génération de signal In-Quadrature peut notamment être réalisée en utilisant la transformation de Hilbert, la transformation inverse de Park, ou en appliquant un délai d'un quart de période sur le signal d'entrée. Des structures utilisant un intégrateur généralisé du second ordre (*Second Order Generalized Integrator*), appelées SOGI-PLL, sont aussi une bonne alternative à la génération d'un signal orthogonal. Il existe de plus des types de PLL utilisant un filtre adaptatif afin de gérer ces mêmes problèmes, comme la PLL « renforcée » (Enhanced-PLL). [19]

### 3.3.3 Choix de la Structure

Les structures des PLLs utilisant les signaux In-Quadrature et SOGI-PLL offrent une solution à la question de la composante HF, mais elles requièrent une compréhension des mathématiques avancées. Notre choix se porte sur la structure générale des PLLs, à laquelle nous ajoutons un filtre adaptatif de Notch dans le bloc LF pour résoudre le problème de la composante HF de manière plus accessible.

Pour simplifier certains paramètres, les gains  $k_{pd}$  et  $k_{vco}$  sont fixés à 1. Le comportement de la PLL est alors entièrement régi par les variables du compensateur PI. La pulsation centrale du bloc VCO est fixée à la pulsation théorique du réseau  $\omega_c$ . la nouvelle structure est représentée par la figure 3.9.

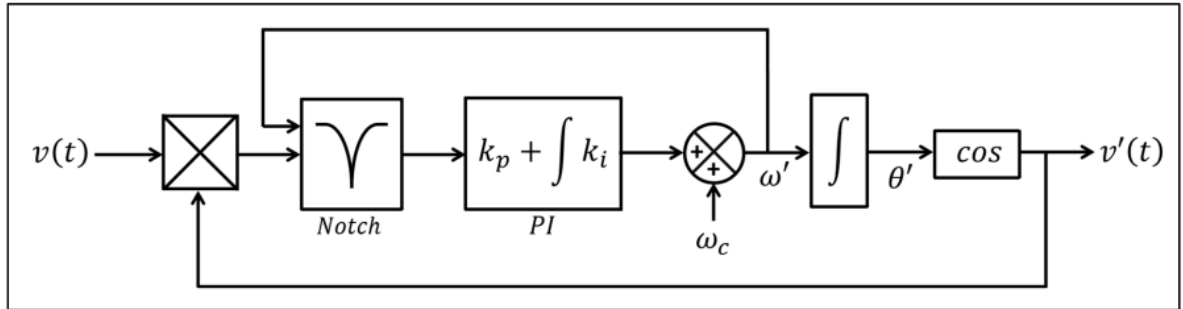


Figure 3.9 Structure de la PLL retenue [1].

Le signal d'entrée  $v(t)$  correspond à la tension du réseau mesurée au PCC. Nous pouvons alors écrire les équations du circuit :

$$\begin{cases} v(t) = V \cdot \sin(\theta) \\ v'(t) = \cos(\theta') \end{cases} \quad (3.3)$$

Et

$$\begin{cases} \theta = \omega t + \Phi \\ \theta' = \omega' t + \Phi' \end{cases} \quad (3.4)$$

Avec :

- $V$  : amplitude de la tension du réseau
- $\theta$  et  $\theta'$  : angle du réseau et angle estimé
- $\omega$  et  $\omega'$  : pulsation du réseau et pulsation estimée
- $\Phi$  et  $\Phi'$  : phase du réseau et phase estimée

Le signal d'erreur en sortie du bloc PD est alors donné par :

$$\varepsilon_{pd} = v(t) * v'(t) = V \cdot \sin(\omega t + \phi) \cdot \cos(\omega' t + \Phi') \quad (3.5)$$

Ce qui implique :

$$\varepsilon_{pd} = \frac{V}{2} [\sin((\omega + \omega')t + (\Phi + \Phi')) + \sin((\omega - \omega')t + (\Phi - \Phi'))] \quad (3.6)$$

L'équation (3.6) étant non-linéaire, une linéarisation est requise afin de pouvoir faire l'étude du système. Nous pouvons voir ici que la sortie du PD contient l'information recherchée sur l'erreur de phase  $(\Phi - \Phi')$ , mais aussi une composante haute fréquence donnée par  $\sin((\omega + \omega')t + (\Phi + \Phi'))$  à deux fois la fréquence du réseau.

En supposant que le bloc LF est correctement dimensionné, donc il supprime la composante HF l'équation (3.6) HF devient (3.7).

Sachant qu'en régime permanent  $\omega \approx \omega'$  et en appliquant l'approximation des sinus des petits angles  $\sin(\Phi - \Phi') \approx \Phi - \Phi' \approx \theta - \theta'$  :

$$\varepsilon_{pd} = \frac{V}{2} (\theta - \theta') \quad (3.7)$$

L'impact du filtre de Notch sur la réponse fréquentielle est négligeable ; en effet il n'a une influence qu'à sa fréquence d'encoche, et sur une très faible plage autour de celle-ci. [20]

Cette dernière étant réglée pour supprimer la composante à deux fois la fréquence du réseau, ce filtre n'aura pas d'impact aux fréquences considérées ici pour l'étude.

Le modèle résultant de ces simplifications est représenté par le schéma bloc de la figure 3.10. Ce dernier est un modèle linéaire et sa fonction de transfert est donnée par l'équation (3.8) [1].

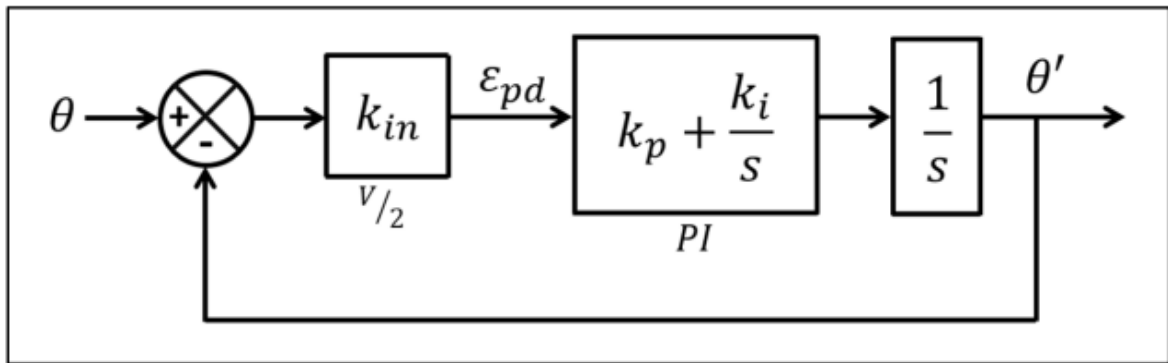


Figure 3.10 Schéma bloc du système linéarisé [1].

La fonction de transfert du système linéarisée :

$$H_{PLL}(s) = \frac{\theta'(s)}{\theta(s)} = \frac{k_{in}k_p \cdot s + k_{in}k_i}{s^2 + k_{in}k_p \cdot s + k_{in}k_i} \quad (3.8)$$

Sachant que l'équation canonique du système du second ordre est :

$$H_2(s) = \frac{2\xi\omega_n \cdot s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n \cdot s + \omega_n^2} \quad (3.9)$$

Avec

- $\xi$  : le facteur d'amortissement
- $\omega_n$  : la pulsation naturelle du système

Par identification entre (3.8) et (3.9)

$$\begin{cases} k_p = \frac{2\xi\omega_n}{k_{in}} \\ k_i = \frac{\omega_n^2}{k_{in}} \end{cases} \quad (3.10)$$

Ce qui implique

$$\begin{cases} \xi = \frac{k_p k_{in}}{2\sqrt{k_{in}k_i}} \\ \omega_n = \sqrt{k_{in}k_i} \end{cases} \quad (3.11)$$

## 3.4 La régulation

### 3.4.1 Généralités et principes

Le principe de régulation est indispensable dans la commande de systèmes automatiques. Les régulateurs PI sont très utilisés pour contrôler les systèmes linéaires. Comme nous pouvons voir en la figure 3.11, ils sont composés d'une partie proportionnelle avec un gain  $K_p$  et d'une partie intégrale composée d'un gain  $K_i$  et intégrateur  $\frac{1}{s}$ . La partie proportionnelle a pour rôle de réduire l'erreur de réglage, qui est inversement proportionnelle à ce gain. Plus le gain est grand, plus l'erreur est réduite et plus la réponse devient oscillatoire. La partie intégrale a pour rôle d'éliminer l'erreur statique. Il existe aussi des régulateurs PID avec une composante supplémentaire proportionnelle à la dérivée de l'écart. [19]

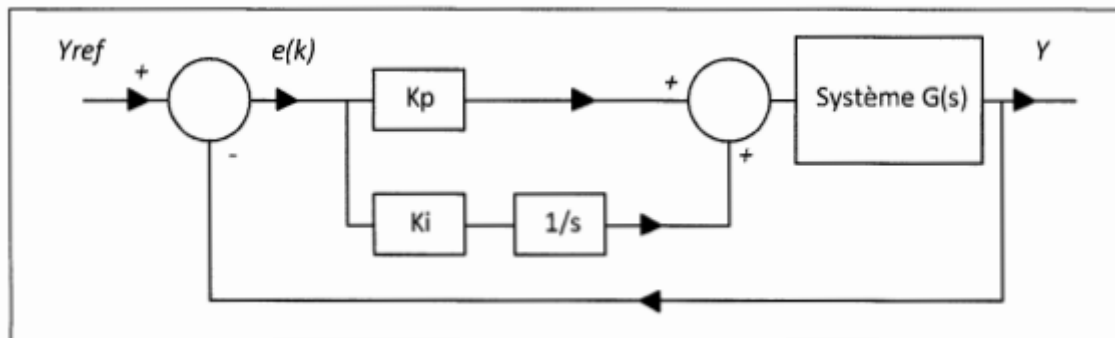


Figure 3.11 Structure d'un régulateur PI [19].

Le régulateur PRes, proportionnel résonnant a le même principe que le régulateur PI avec une partie intégrale un peu plus développée. En effet, la partie intégrateur  $\frac{1}{s}$  est remplacée par la relation (3.12)

$$\frac{2\omega_c}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (3.12)$$

où  $\omega_c$  est la bande passante autour de la fréquence du système  $\omega_0$ .

La principale différence entre le régulateur PRes et le régulateur PI réside dans leur approche de régulation. Alors que le régulateur PI est un régulateur linéaire à temps continu, le PRes utilise des concepts de résonance et fonctionne à des fréquences spécifiques. Cela permet au PRes de fournir une réponse plus précise et une meilleure performance, en particulier dans des domaines où la rejection des harmoniques est importante. [21]

A part les régulateurs PI et PRes, il existe des régulateurs par commande avancée et des régulateurs flous.

Les régulateurs dits « avancés » sont en grande majorité utilisés pour les systèmes non linéaires. car, les régulateurs classiques de type PI, PID, PRes ne sont pas robustes. Ils sont largement utilisés depuis les années 50 dans le pilotage de satellite par exemple ou encore dans les systèmes à MIMO (entrées multiples et sorties multiples), comme dans les systèmes de suspension actifs. La technologie de régulation par commande avancée repose sur le retour d'état du système en boucle fermée. À tout instant, le vecteur de commande est calculé à partir de la valeur du vecteur d'état retourné par les capteurs, et du vecteur d'état désiré, ou consigné. Pour cela, une modélisation du système en modèle d'état est nécessaire. [22]

Dans la famille des régulateurs flous, il existe plusieurs types : Mamdani, Sugeno ou encore ANFIS (Adaptive Neuro-Inference System). L'objectif de ces régulateurs est d'utiliser les

régulateurs classiques, mais en ajoutant des améliorations pour atteindre de meilleurs résultats, une meilleure réponse temporelle. [23]

Dans ce travail nous utilisons le régulateurs PRes à cause de sa bonne réputation dans le domaine de la rejection des harmoniques.

### 3.4.2 Compensation harmonique

Les contrôleurs résonants offrent des caractéristiques intéressantes pour notre application. Ils présentent une résonance à une fréquence permettant ainsi d'obtenir un gain infini à cette fréquence, y compris dans un référentiel naturel. Le suivi d'une référence sinusoïdale est alors plus performant qu'avec un contrôleur PI classique. L'association de plusieurs compensateurs résonants en parallèle, chacun réglés à une fréquence différente des autres, permet de plus une rejection des perturbations à ces fréquences ; ce qui concorde parfaitement avec la problématique de rejection harmonique. Un terme proportionnel est ajouté pour des contraintes de stabilité et de rapidité de la réponse temporelle ; nous parlons alors de compensateurs proportionnel-résonant (P-Res). L'équation d'une association en parallèle de P-Res idéaux est la suivante [1]:

$$G_{PR,ideal}(s) = k_p + \sum_{h=1,2,3,..}^{h_{max}} \frac{2k_r s}{s^2 + (h + \omega_r)^2} \quad (3.13)$$

Avec :

- $k_r$  : gain résonant
- $k_p$  : gain proportionnel
- $h$  : ordre harmonique
- $\omega_r$  : pulsation fondamentale

Un compensateur P-Res idéal tel qu'on l'a décrit n'est pas réalisable en pratique, du fait de son gain infini, qui conduit à un facteur de qualité infini. Des problèmes de stabilité peuvent de plus survenir. Il convient alors d'introduire un terme d'amortissement  $\xi$  pour donner un P-Res non-idéal. Celui-ci présente un gain fini à  $\omega_r$ , mais qui reste tout de même suffisamment important pour atteindre une erreur statique nulle. De plus, le facteur d'amortissement permet un élargissement de la bande passante du P-Res, et ainsi une meilleure réaction lors de déviations de fréquence. C'est ce type de compensateur que nous adopterons ici. Son expression est la suivante [1]:

$$G_{PR,non\ ideal}(s) = k_p + \sum_{h=1,2,3,..}^{h_{max}} \frac{2k_r \xi (h\omega_r) s}{s^2 + 2\xi (h\omega_r) s + (h\omega_r)^2} \quad (3.14)$$

### 3.5 La mise ensemble

Le système complet de l'onduleur connecté au réseau est constitué d'un pont H, d'un filtre LCL pour éliminer la porteuse dans le signal de sortie, d'une boucle à verrouillage de phase pour mesurer l'angle et la fréquence du réseau, d'une régulation pour contrôler l'écart entre la consigne et la sortie et d'un générateur *SPWM* pour moduler la référence sinusoïdale et la porteuse triangulaire. Le système complet est illustré par les figures 3.12 et 3.13.

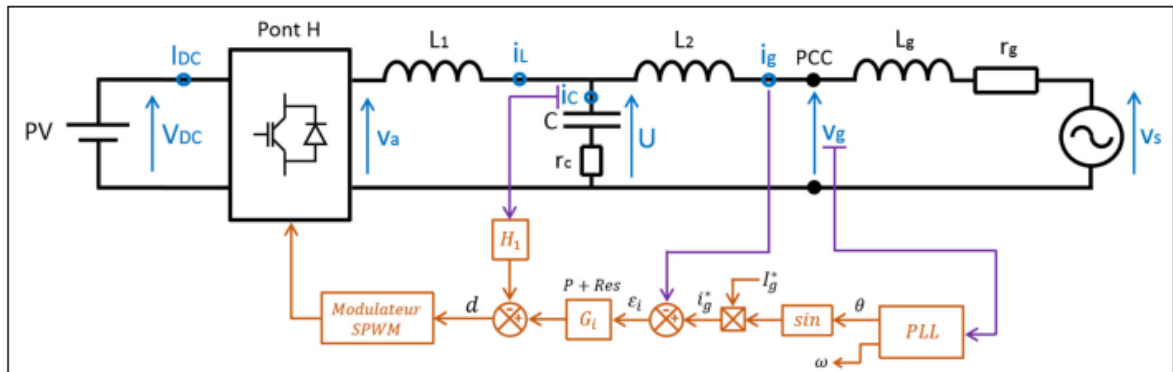


Figure 3.12 Schéma de l'onduleur synchronisé au réseau et de sa commande [1].

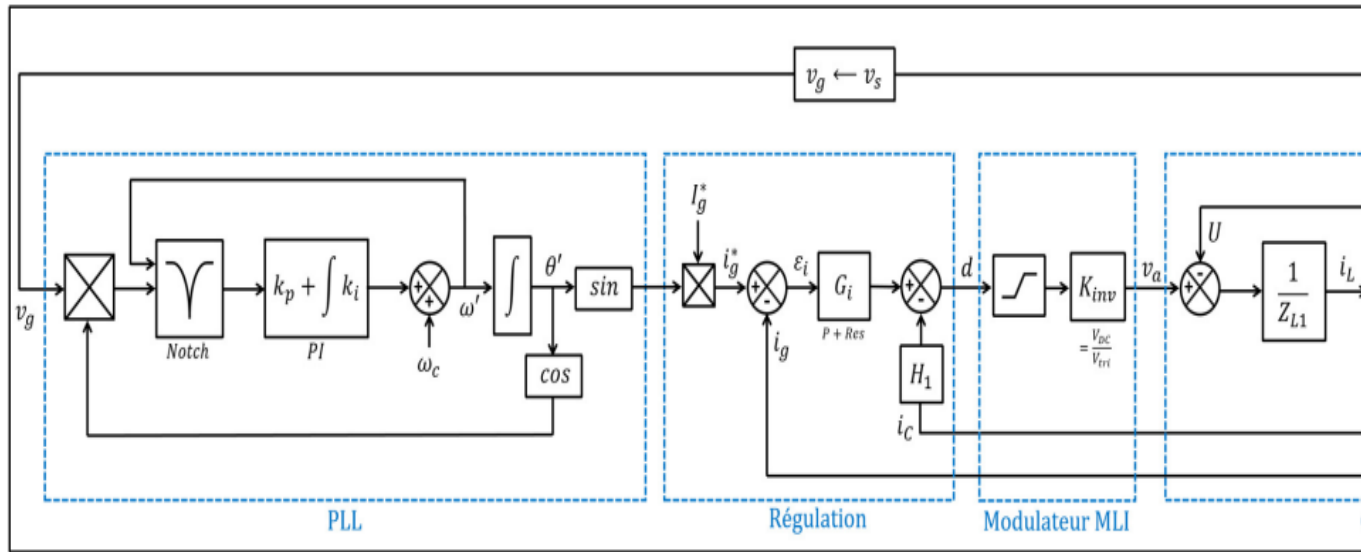


Figure 3.13 Modèle de l'onduleur synchronisé au réseau et de sa commande [1].

### **3.6 Conclusion partielle**

L'interconnexion et l'injection d'une tension générée à partir d'une source externe dans un réseau électrique nécessitent une synchronisation constante entre les deux tensions. Dans ce chapitre, nous avons étudié les composants de la commande typique des onduleurs connectés au réseau. Nous avons examiné en détail la conception et la simulation d'un générateur SPWM destiné à commander directement le pont H de l'onduleur. Nous avons également exploré le fonctionnement du PLL (boucle à verrouillage de phase), qui extrait les paramètres essentiels du réseau pour la synchronisation. De plus, nous avons souligné l'importance de la régulation, en notant que le régulateur proportionnel résonant est particulièrement adapté à notre système.

En résumé, nous pouvons noter que la commande d'un onduleur connecté au réseau inclut généralement un générateur SPWM, une boucle à verrouillage de phase et un régulateur. Ces éléments peuvent être mis en œuvre avec des composants physiques ou à l'aide d'algorithmes dans un microcontrôleur ou un FPGA.

Le chapitre suivant se concentrera sur le développement d'un prototype d'onduleur assisté.

# Chapitre 4

## Développement d'un prototype d'onduleur connecté au réseau

### 4.1 Introduction

Ce chapitre est dédié à la création d'un dispositif expérimental conçu pour mettre en pratique les principes théoriques que nous avons développés.

Tout onduleur contient principalement deux grands blocs, la partie commande et la partie de puissance. Un onduleur assisté se distingue des onduleurs classiques par sa partie commande qui doit se synchroniser à une tension d'un réseau utilitaire. Pour parvenir à cette finalité, un onduleur assisté, en plus du générateur de signaux, est typiquement équipé d'une boucle à verrouillage de phase et d'une boucle de régulation. La boucle à verrouillage de phase prélève la fréquence et la phase de la tension du réseau. La boucle de régulation ajuste la tension de l'onduleur à celle du réseau.

Vu tous les avantages qu'offre le numérique par rapport à l'analogique, nous optons pour une commande numérique. Les algorithmes du SPWM, de la boucle à verrouillage de phase et du régulateur seront implémentés dans un microcontrôleur principal MCU (*Micro Controller Unit*). Pour permettre une connectivité à l'internet, au microcontrôleur principal nous associons un microcontrôleur d'IOT (*Internet Of Things*).

Dans le développement de ce convertisseur nous prenons comme hypothèse que la tension DC d'entrée est constante ; ce qui n'est pas toujours vrai en pratique.

En pratique les onduleurs assistés sont alimentés par un champs des modules photovoltaïques dont la tension de sortie varie avec l'intensité lumineuse du soleil. Pour maximiser la puissance on insère un régulateur MPPT entre le champ des modules PV et l'onduleur assisté.

## **4.2 Schéma bloc**

Le schéma synoptique représentant les principaux éléments du système et leur interconnexion est illustrée à la figure 4.1.

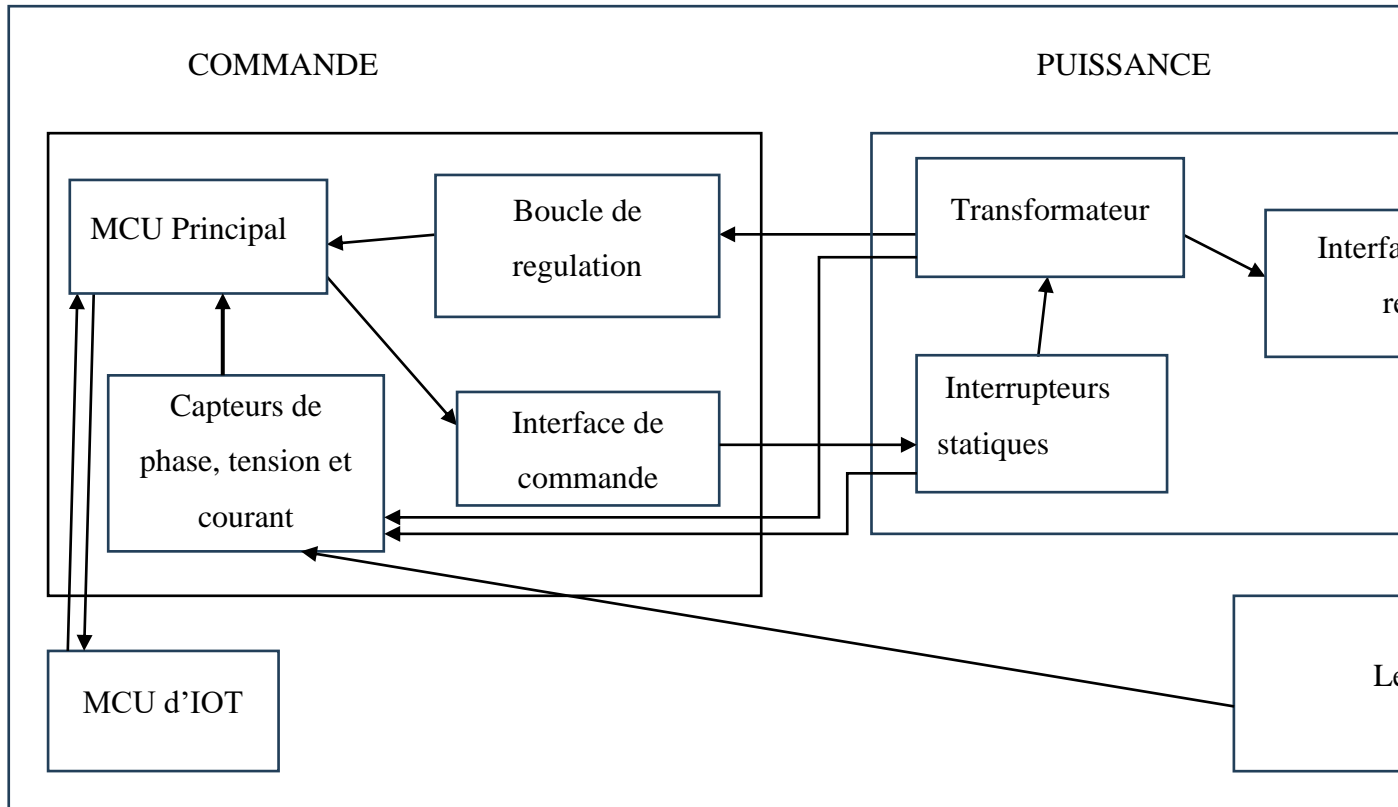


Figure 4.1 Schéma bloc du prototype de l'onduleur assisté

## 4.3 La commande

### 4.3.1 Le microcontrôleur

Afin de commander et combiner les différents composants de la carte expérimentale, on a utilisé le Atmega328p de ATMEL. C'est un microcontrôleur numérique de la famille AVR de 8-bits, son brochage est repris à la figure 4.2

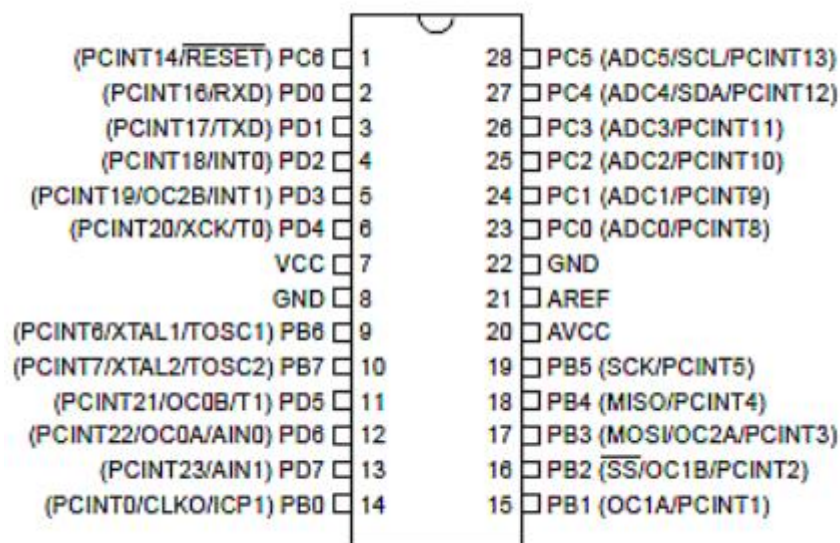


Figure 4.2 Brochage de l'Atmega328p [7].

### 4.3.2 L'acquisition des données

Pour cette réalisation nous avons prélevé la tension du réseau en vue de détecter sa phase, sa fréquence et son amplitude. Nous avons prélevé aussi la tension aux bornes du transformateur de puissance pour réguler cette dernière. Ces deux prélèvements ont été réalisés à l'aide des transformateurs abaisseurs, d'une tension de 220V/24V et d'une puissance de 10VA. Ces

transformateurs sont associés à des diodes redresseuses et à des potentiomètres selon le schéma de la figure 4.3.

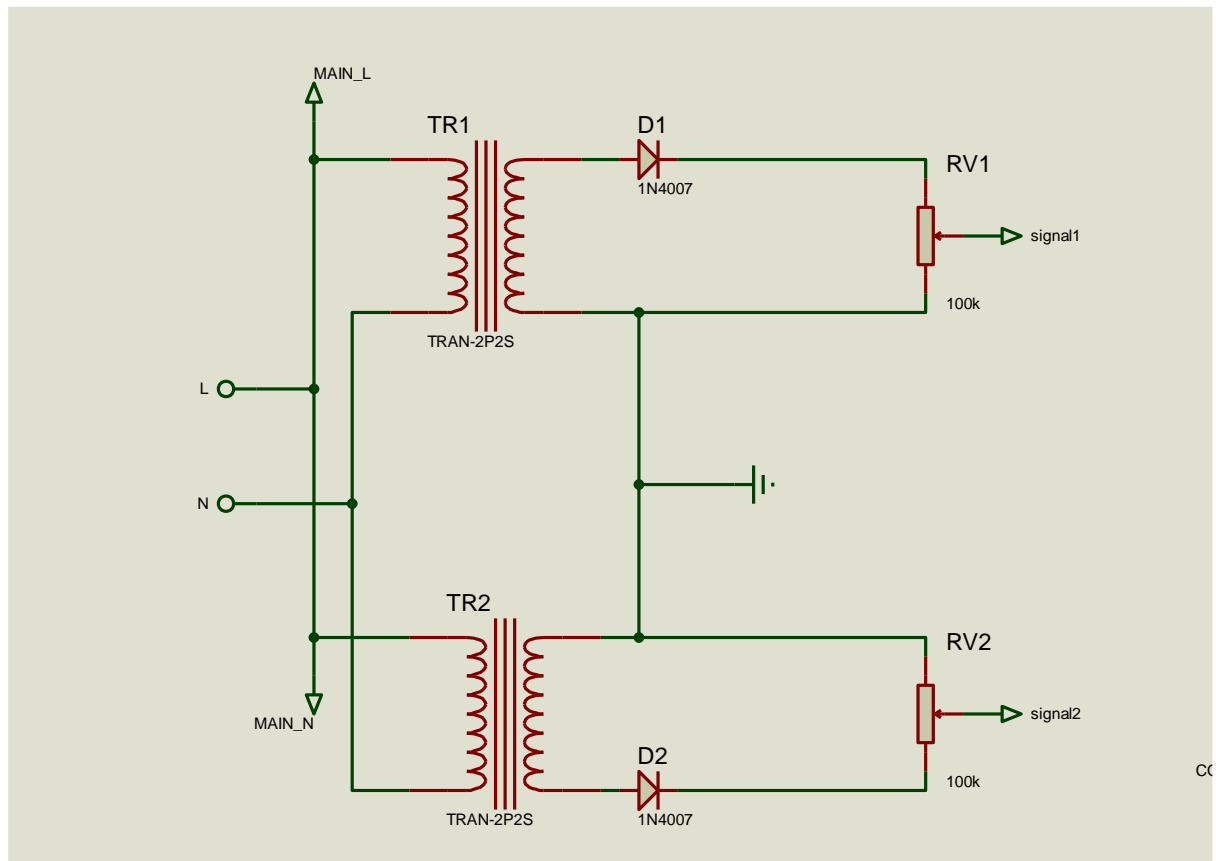


Figure 4.3 Schéma du dispositif de prélèvement de la tension du réseau

Le premier transformateur associé à son redresseur mono alternance prélève la première alternance de la tension du réseau et le deuxième ensemble transformateur redresseur prélève l'autre alternance de la tension du réseau.

A une tension du réseau de 220V, nous fixons une tension de sortie à 1V à l'aide des potentiomètres de 100 k $\Omega$ .

A part le prélèvement des tensions, nous avons prélevé le courant entre notre convertisseur et le réseau à l'aide d'un transformateur d'intensité. Ce prélèvement nous permet de détecter l'injection de l'énergie dans le réseau. Ce prélèvement est représenté sur le circuit de puissance de la figure 4.6 par le transformateur *TR4*.

### **4.3.3 Expérimentation de la commande**

Le circuit de commande comprend principalement le microcontrôleur muni de son code repris à l'ANNEXE2. Le microcontrôleur est associé aux différents capteurs de courant et de tensions qui constituent ces entrées. En outre les éléments précités, la commande comprend une interface de sortie constituée du circuits intégré *HIP4082* pour piloter les transistors de puissance, et du circuit intégré *ULN2004* pour commander le relais. La figure 4.4 représente le schéma complet du circuit de commande.

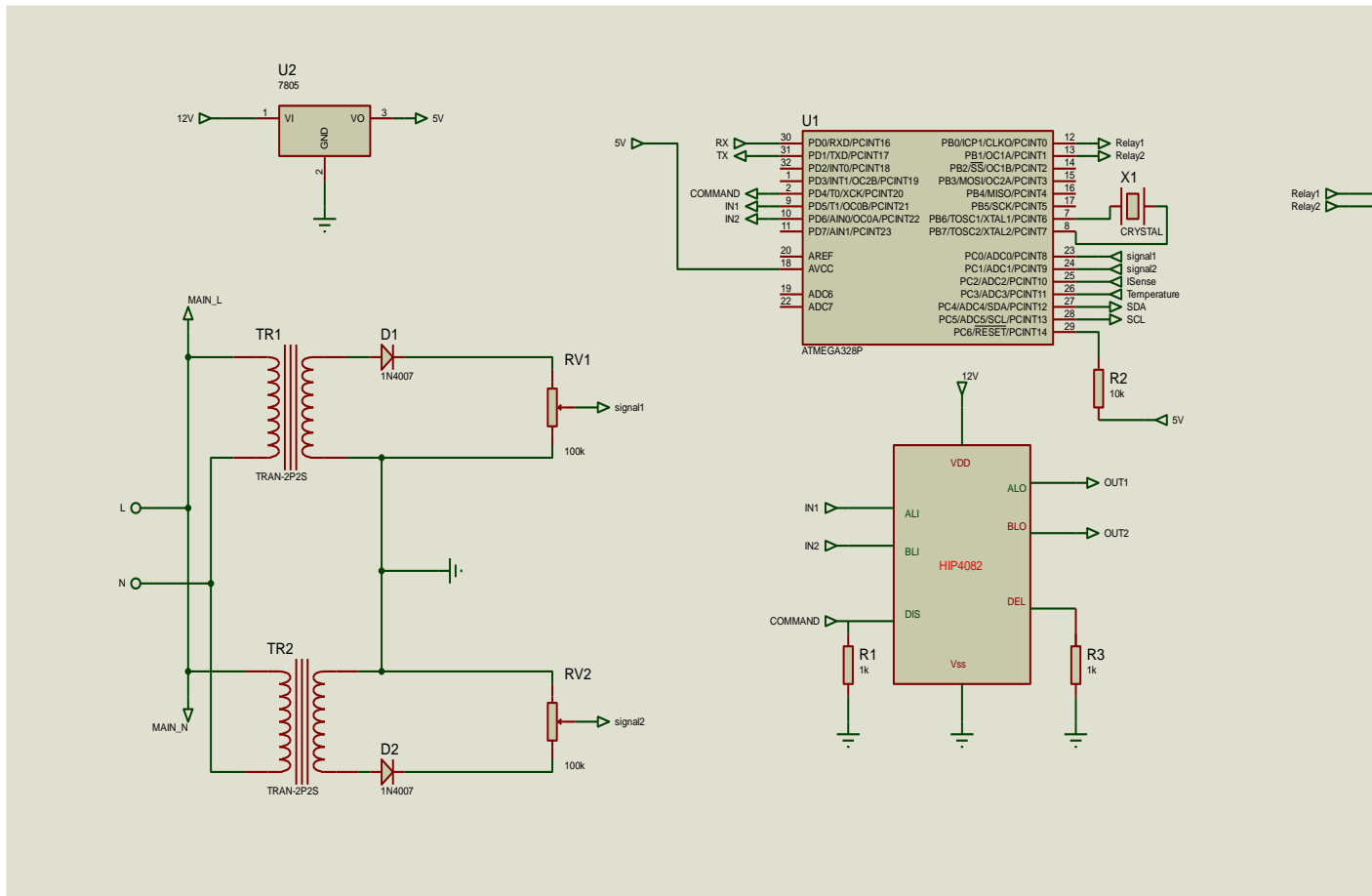


Figure 4.4 Schéma du circuit de commande du prototype

L'objectif de ce circuit de commande est de générer un signal SPWM à partir de la phase et de la fréquence du réseau. Le signal SPWM (en bleu) généré à partir d'une alternance (en jaune) de la tension du réseau est représenté à la figure 4.5

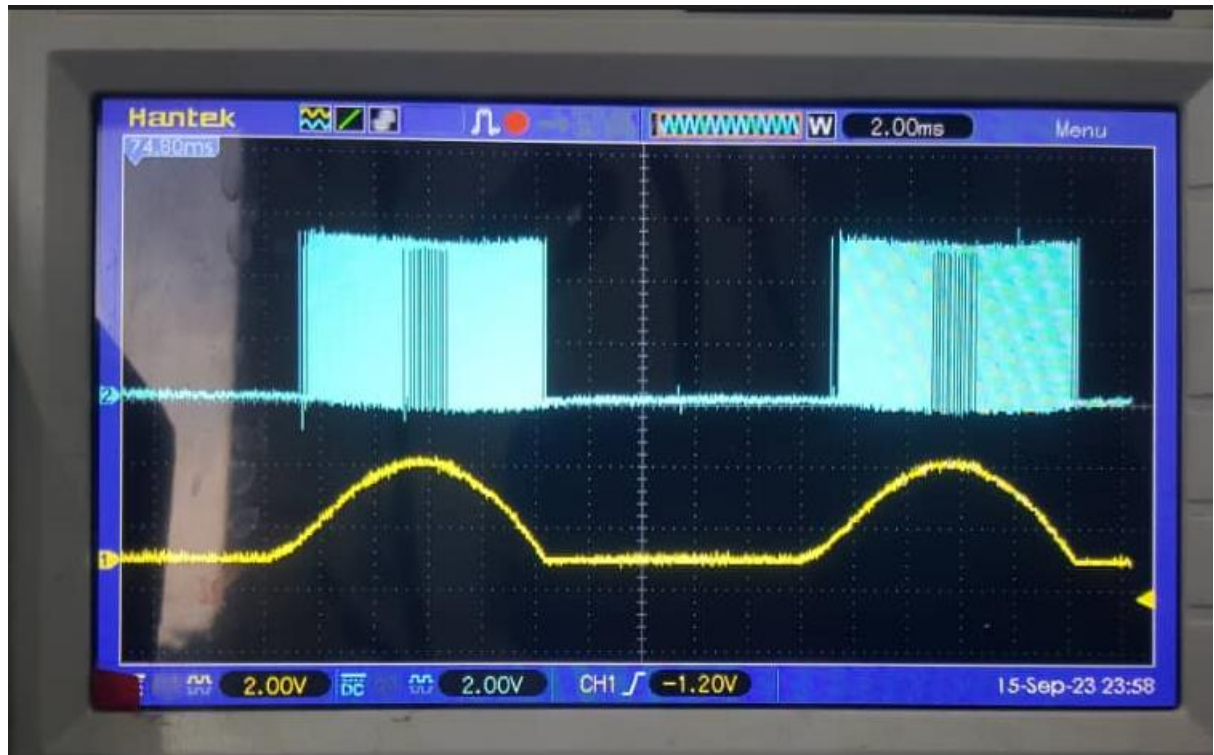


Figure 4.5 Signal SPWM et échantillon du réseau

#### 4.4 La partie de puissance

Nous avons réalisé la partie puissance à l'aide d'un transformateur à point milieu associés à deux transistors MOSFET canal N, le IRF4768, montés en PUSH-PULL suivant le schéma de la figure 4.6.

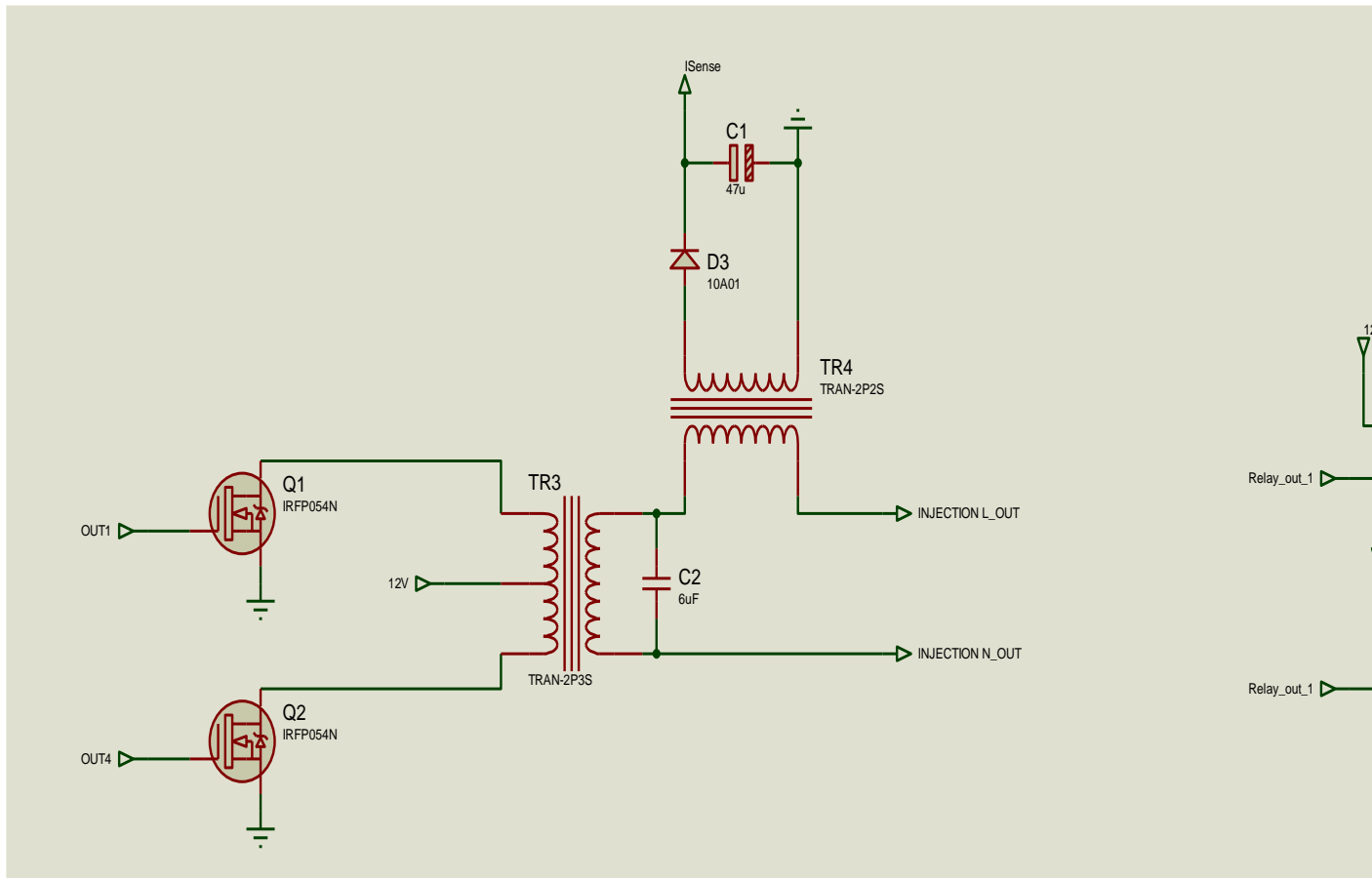


Figure 4.6 Schéma du circuit de puissance du prototype

Afin de purifier le signal de modulation à largeur d'impulsion sinusoïdale (SPWM) et profiter de sa capacité de filtrage aisée, nous avons utilisé un filtre passe-bas en associant une capacité de  $4,4\mu\text{F}$  à la bobine secondaire du transformateur de puissance. Ce filtrage s'est révélé efficace pour extraire une sinusoïde de 50Hz, comme illustré dans la figure 4.7.

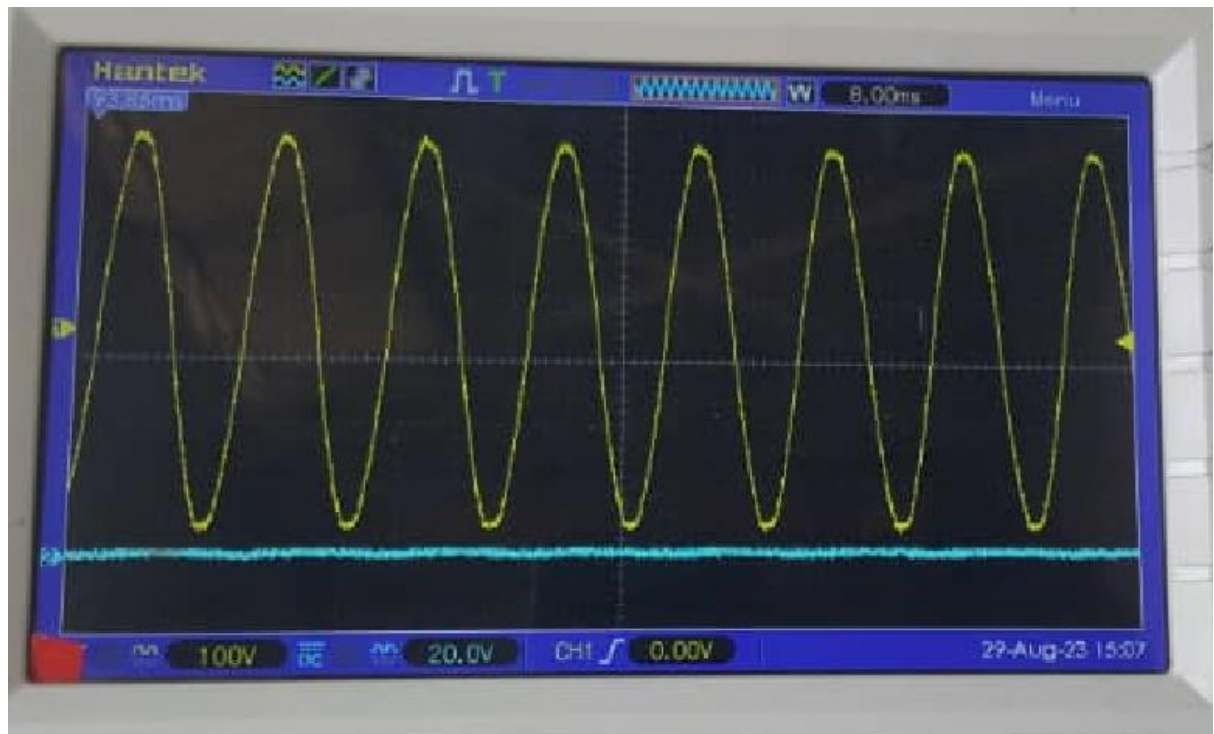


Figure 4.7 Sinusoïde obtenue après filtrage du SPWM

## 4.5 La communication avec l'extérieur

Ce convertisseur est muni de deux interfaces de sortie, un afficheur LCD LM016L et d'un microcontrôleur d'IOT nodeMCU ESP8266 couplé à une application mobile. L'afficheur LCD est branché suivant le schéma de la figure 4.8 Le code du *nodeMCU* est repris à l'ANNEXE3.

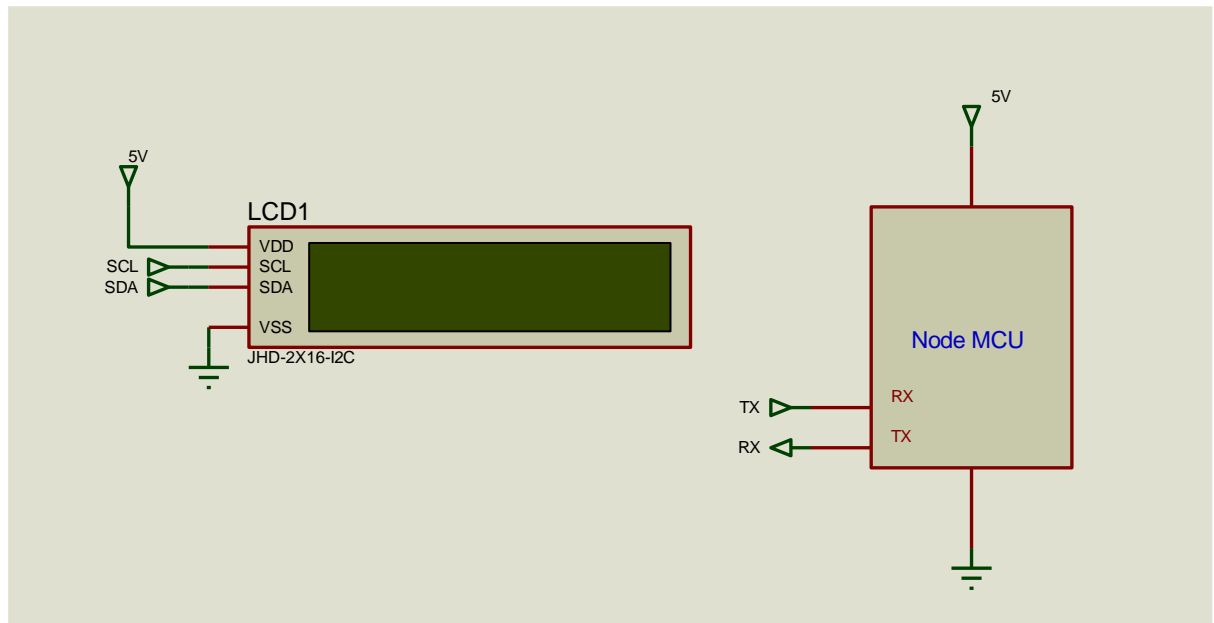


Figure 4.8 schéma des éléments de communication avec l'extérieur

## 4.6 La mise en ensemble

### 4.6.1 Schéma complet

En plus des éléments principaux de commande et de puissance, le schéma complet comprend une sonde de température, les dispositifs de protection et la capacité de filtrage. Il est représenté à la figure 4.9. La photo du prototype est reprise à l'ANNEXE4.

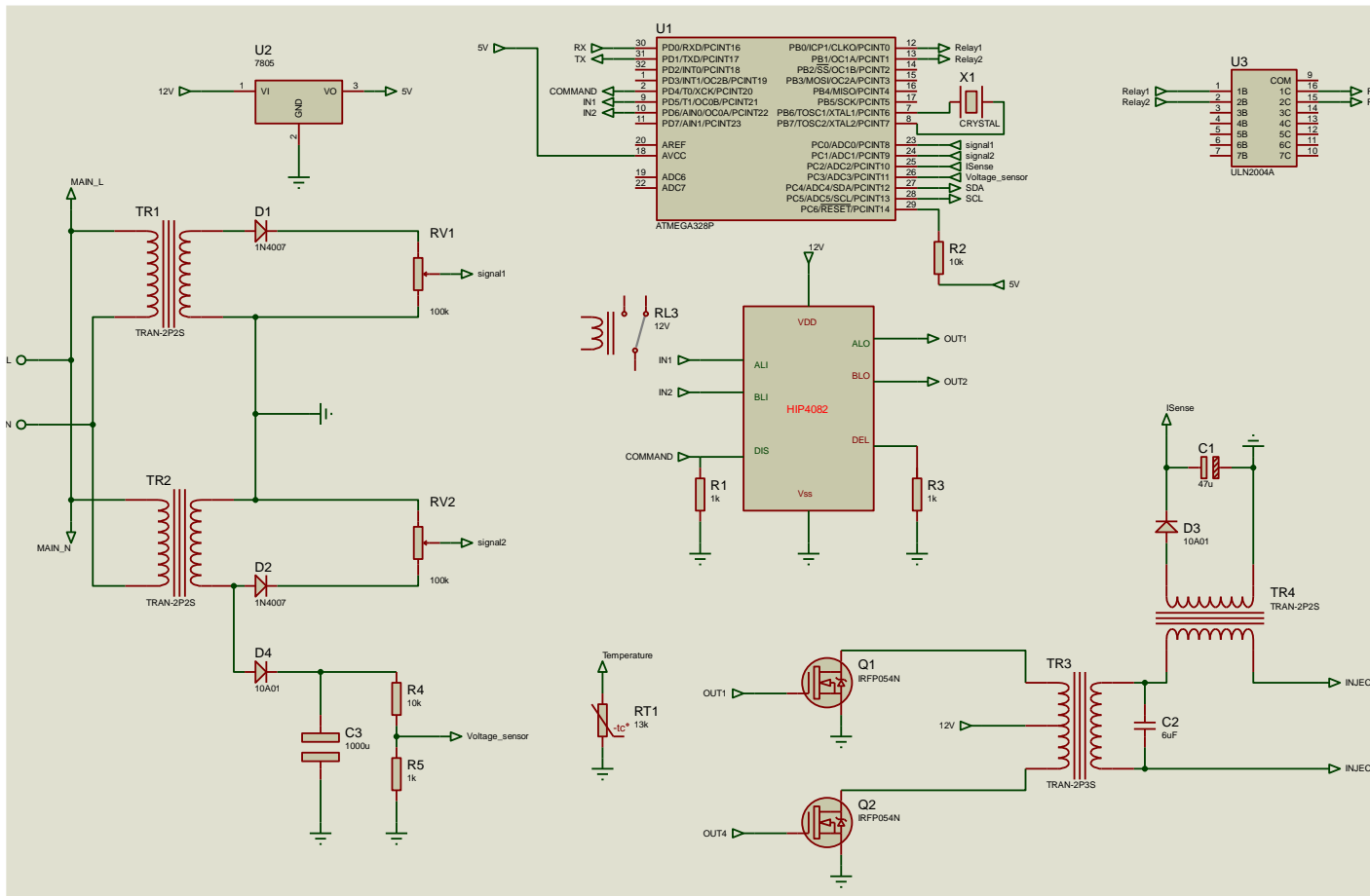


Figure 4.9 schéma complet du convertisseur

#### 4.6.2 Coût de l'appareil

Le tableau 4-1 présente la liste des matériels, leurs caractéristiques, leurs quantités et leurs prix sur le marché de Goma.

Tableau 4-1 Cout de l'appareils

<i>Désignation</i>	<i>Caractéristiques</i>	<i>Quantité</i>	<i>Prix unitaire</i>	<i>Prix total</i>
<i>Microcontrôleur</i>	Atmega328p	1 pièce	\$10	\$10
<i>nodeMCU</i>	ESP8266	1 Piece	\$20	\$20
<i>Afficheur LCD</i>	2*16	1 Piece	\$20	\$20
<i>Transistor</i>	IRF4768	2 pièces	\$5	\$10
<i>Transformateur</i>	2*12V/220V,1KVA	2 pièces	\$5	\$10
<i>Transformateur</i>	34V/220V, 10VA	1 pièce	\$30	\$30
<i>TI</i>		1 pièces	\$5	\$5
<i>Relais</i>	12V/10A	2 pièces	\$2	\$4
<i>Circuit intégré</i>	HIP4082	1 pièce	\$1	\$1
<i>Circuit intégré</i>	ULN2004	1 pièce	\$1	\$1
<i>Carte imprimée</i>		1 pièce	\$6	\$6
<i>Etain</i>		1 rouleau	\$15	\$15

<i>Diodes</i>	1 lot	\$5	\$5
<i>Condensateurs</i>	1 lot	\$5	\$5
<i>Résistances</i>	1 lot	\$5	\$5
<i>Radiateurs et ventilateurs</i>			\$10
<i>Accessoires</i>			\$50
<i>Boitier</i>			\$50
<i>Total matériels</i>			\$257
<i>Développement logiciel</i>			\$100
<i>Main d'œuvre</i>			\$50
<b><i>TOTAL</i></b>			<b>\$407</b>

## 4.7 Bref aperçu de l'application

Pour assurer la fonctionnalité d'IOT (*Internet of Things*) à notre appareil nous avons associé au microcontrôleur nodeMCU du schéma complet de la figure 4.9 une application mobile, développée avec *Kodular Creator*, qui permet de commander, allumer et éteindre, de surveiller la consommation de l'installation via le réseau internet. La capture d'écran de l'application mobile est représentée à la figure 4.10.

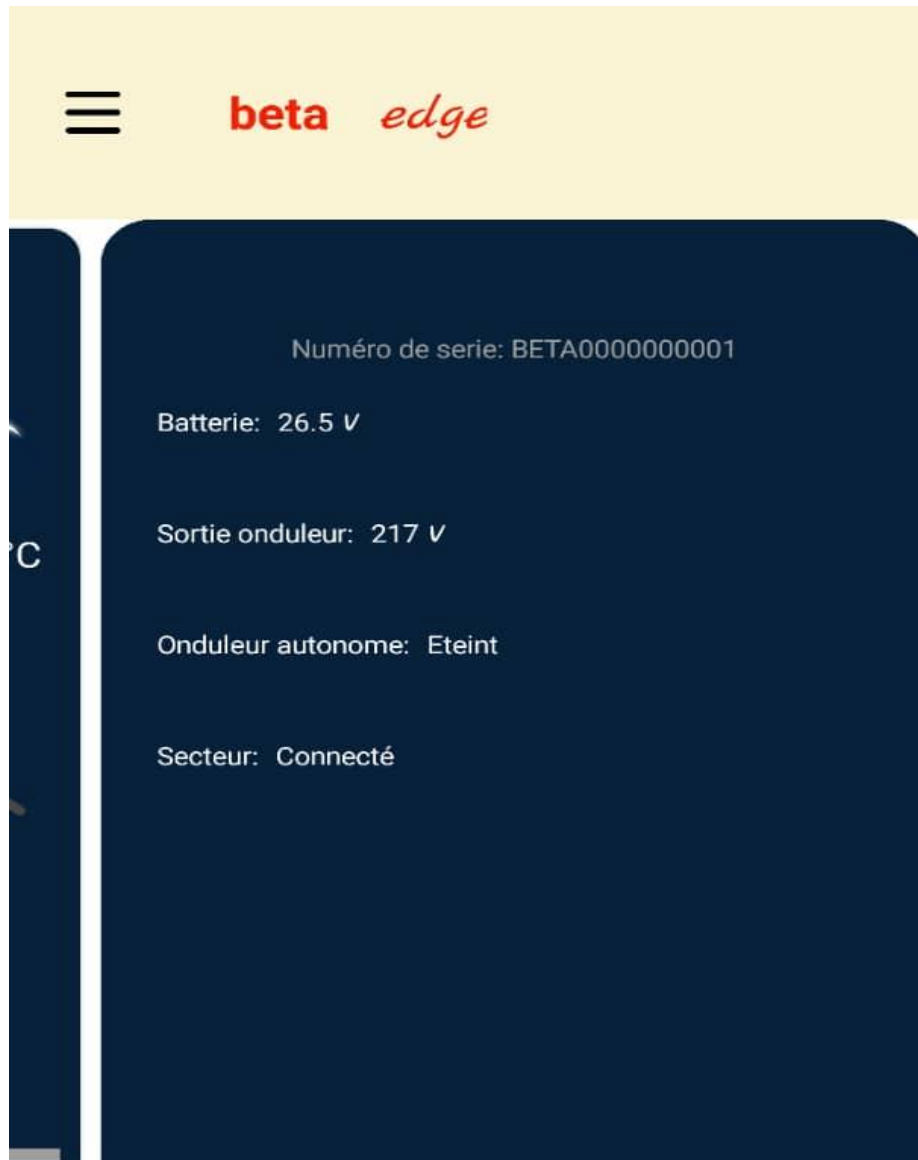


Figure 4.10 Capture d'écran de l'application mobile

## 4.8 Conclusion partielle

Dans ce chapitre, nous présentons notre convertisseur ainsi que son processus de développement. Nos expérimentations avec le convertisseur ont validé la concordance avec la

théorie. Le cœur de ce dispositif réside dans une commande numérique fondée sur la programmation des algorithmes essentiels d'un onduleur, intégrée dans un microcontrôleur. De plus, notre convertisseur offre une fonctionnalité IoT grâce à un microcontrôleur auxiliaire qui est associé à une application mobile.

# Conclusion générale

## Contributions

Dans ce travail nous avons étudié les systèmes photovoltaïques et conçu un onduleur assisté. Premièrement, nous avons parcouru la littérature pour étudier l'énergie solaire, le principe de fonctionnement et la constitution des systèmes photovoltaïques et les généralités sur les onduleurs connectés au réseau. Deuxièmement, nous avons réalisé la modélisation mathématique d'un onduleur connecté au réseau. Nous avons créé un modèle en utilisant un espace d'état, et le résultat obtenu a pleinement répondu à nos attentes. Troisièmement, nous avons conçu de la commande d'un onduleur assisté en explorant les défis technologiques inhérents à cette commande, notamment la détection de la phase et de la fréquence du réseau afin de reproduire une sinusoïde identique en phase, en fréquence et en amplitude. Pour atteindre cet objectif, l'approche privilégiée repose sur l'utilisation d'un générateur SPWM, d'un PLL et d'un régulateur proportionnel résonant.

Enfin, nous avons développé un prototype de ce convertisseur. Le prototype est constitué principalement par un microcontrôleur qui est muni d'un programme qui implémente l'algorithme des éléments essentiels d'un onduleur connecté au réseau. En plus du microcontrôleur principal, nous avons ajouté un microcontrôleur auxiliaire pour garantir une fonctionnalité d'IOT.

Considérant les observations énoncées tout au long de ce travail, partant des hypothèses et de la problématique de l'introduction de ce travail ; nous pouvons conclure ce qui suit :

- Il est possible de réaliser localement un onduleur connecté au réseau et cet appareil sera accessible à une grande partie des ménages de Goma.

- Un onduleur connecté au réseau maximise la rentabilité d'un système photovoltaïque par ce qu'il permet de mettre à disposition d'autres personnes le surplus de production des systèmes PV.
- La commande à modulation d'impulsion permet de maximiser l'efficacité énergétique de l'onduleur assisté. D'une part, l'utilisation, dans la commande, d'une boucle à verrouillage de phase permet à l'onduleur de se synchroniser instantanément au réseau. D'autre part l'insertion d'un filtre passe bas entre l'onduleur et le réseau permet d'éliminer des harmoniques venant de l'onduleur.
- L'incorporation d'un onduleur connecté au réseau avec un microcontrôleur, ainsi qu'un filtre et des compensateurs d'énergie réactive, permet de répondre aux exigences d'interopérabilité entre les sources décentralisées et le réseau électrique principal de manière efficace.

## **Critique du travail**

Le travail présenté dans ce mémoire ne vise pas à fixer un dimensionnement rigide de la commande. Il permet d'avoir un aperçu général sur le concept d'onduleur assisté et d'injection d'énergie d'une source décentralisée sur un réseau utilitaire. Le convertisseur utilisé pour vérifier les théories n'inclut pas toutes les technologies décrites dans la littérature.

L'ensemble des travaux présentés dans ce mémoire se concentre très précisément sur le fonctionnement de l'onduleur en supposant une tension DC parfaitement constante. Ce qui n'est pas toujours vrai en pratique.

## **Travaux futurs de recherche/Perspectives**

Nous ne pouvons pas prétendre avoir conçu un appareil idéal, les chercheurs désireux peuvent le compléter en approfondissant les différentes notions théoriques se trouvant dans ce travail.

Il est intéressant de penser à implémenter des algorithmes d'intelligence artificielle dans la commande, notamment les algorithmes des régulateurs flous dans la boucle de régulation. Vu que la tension des panneaux PV n'est pas toujours constante, il est pertinent de modéliser, puis d'établir la commande du hacheur, faisant l'interface entre les panneaux photovoltaïques et le bus DC. Cette commande aura pour but de réaliser le suivi du point de puissance optimal, via un algorithme MPPT.

## Bibliographie

- [1] C. BRUYANT-ROZOY, Conception de la commande et analyse de stabilité d'un onduleur photovoltaïque connecté au réseau de distribution, MONTRÉAL: ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE UNIVERSITÉ DU QUÉBEC, 2019.
- [2] A. Arnold, *Conception d'un onduleur pur sinus*, Goma: ULPGL.
- [3] Virunga energies, [En ligne]. Available: <https://energies.virunga.org>. [Accès le 7 Aout 2023].
- [4] Africa News, «RDC: Nuru inaugure une centrale solaire hybride de 1,3 MW à Goma,» 5 Février 2020. [En ligne]. Available: <https://www.africanewsrdc.net/actu/nuru-centrale-solaire-hybride-goma/>. [Accès le 7 Aout 2023].
- [5] Elan RDC, «RDC : Une mini centrale solaire pour renforcer les besoins en électricité à Goma,» [En ligne]. Available: <https://www.elanrdc.com/blog/2020/3/4/rdc-une-mini-centrale-solaire-pour-renforcer-les-besoins-en-lectricit-goma>. [Accès le 9 Octobre 2023].
- [6] A. S.-L. S. EDDINE, *Etude et sumilation d'un système photovoltaïque*, UNIVERSITE MOKHTAR BADJI .
- [7] Rouge Engineered Designs, «Lumière solaire pour l'horticulture (1/3): Les bases,» RED HORTICULTURE, [En ligne]. Available: <https://www.horticulture.red/fr/expertise/lumiere/lumiere-solaire-pour-lhorticulture-1-3-les-bases/>. [Accès le 18 Septembre 2023].
- [8] Institut bruxellois pour la gestion de l'environnement, *LE PHOTOVOLTAÏQUE FONCTIONNEMENT ET TECHNOLOGIES*, BRUXELLES: BRUXELLES ENVIRONNEMENT, 2010.

- [9] A. T.-. R. Aili, *Modélisation et simulation sous MATALAB/SIMULINK d'un système PV adapté par une commande MPPT*, Tizi-Ouzou, 2014.
- [10] Z. S.-B. Slimane, *Etude et Dimensionnement d'une centrale Photovoltaïque*, Université Mohamed Khider de Biskra Faculté des Sciences et de la Technologie, 2020.
- [11] B. M. Olivier, *COURS CENTRALES ET RESEAUX ELECTRIQUES*, Goma: UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS-LACS FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES, 2021.
- [12] S. A.-D. TOUDERT, *Etude d'un Système Photovoltaïque*, UNIVERSITEMOULOU MAMMERI DE TIZI-OUZOU FACULTE DE GENIEELECTRIQUE ET D'INFORMATIQUE, 2017.
- [13] M. M.-M. Z. KARI, *Conception, simulation et réalisation d'un onduleur assisté (Grid-Tie Inverter)*, Université Abou Bekr Belkaïd de Tlemcen Faculté de Technologie, 2015.
- [14] G. S.-F. L.-P. Delarue, *Électronique de puissance 10e Edition*, DUNOD, 2015.
- [15] A. Merdassi, *Outil d'aide à la modélisation moyenne de convertisseurs statiques pour la simulation de systèmes mécatroniques*, Grenoble: INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE, 2009.
- [16] T. B. Jackson-Daudet, *Cours d'électronique de puissance*, Goma, 2022.
- [17] A. N.-B. Wahiba, *Modélisation et commande d'un onduleur MLI*, Universitaire Larbi Ben M'hidi , 2009.
- [18] G. Couturier, *BOUCLE A VERROUILLAGE DE PHASE*, Dept GEII IUT Bordeaux I.
- [19] Institut d'automatisation industrielle, *Systèmes électroniques ,BOUCLES A VERROUILLAGE DE PHASE*, Haute école spécialisée de suisse occidentale.
- [20] E. A. T. ARIK, *MÉTHODE AVANCÉE DE CONTRÔLE COMMANDE D'UN ONDULEUR MONOPHASÉ POUR UNE RÉDUCTION DE LA BANQUE DE*

*CONDENSATEURS, EN VUE D'ACCROÎTRE LA DURÉE DE VIE DU CONVERTISSEUR*, MONTRÉAL: UNIVERSITÉ DU QUÉBEC , 2018.

- [21] J. L. Ny, *Cours 4 - Filtres analogiques linéaires II Synthèse en cascade de filtres actifs*, MONTREAL: POLYTECHNIQUE MONTREAL, 2015.
- [22] Zammit, *Design of PR current control with selective harmonic compensators using Matlab*, Journal of Electrical Systems and Information Technology, 2017.
- [23] Nise, *Control systems engineering*, Kindle Edition, 6, 2016.
- [24] M. SINGH, *Adaptive network-based fuzzy inference systems for sensorless control of PMSG based wind turbine with power quality improvement features*, MONTREAL: Ecole de Technologie Supérieure, 2010.
- [25] B. Cottencaeu, *Carte ARDUINO UNO Microcontrôleur ATmega328*, Polytech Angers Belle-Beille, 2019-2020.
- [26] JUnit.org. [En ligne]. Available: <http://www.junit.org>. [Accès le 2 Janvier 2019].
- [27] H. Linda, *Onduleurs photovoltaïques connectés au réseau*, Recherche et Développement.

## ANNEXES

### 1. Standards pour l'interconnexion de sources décentralisées au réseau utilitaire.

Cette annexe présente les éléments normatifs quant à l'interconnexion de sources décentralisées (DERs) au réseau utilitaire. Les principaux standards en vigueur sont le IEEE-1547 (IEEE, 2003), paru initialement en 2003 et valable pour l'Amérique du Nord (réseaux de 60Hz), et le IEC-61727 (IEC, 2004), principalement suivi en Europe (réseaux de 50 Hz) [1].

Tableau 1 Résumé des standards pour l'interconnexion de DERs au réseau en conditions normales d'opération [1]

	IEC-61727	
Plage de tension (en % de la tension nominale RMS)	85% - 110%	
Plage de fréquence	50 ± 1Hz	
Facteur de puissance	> 0,9 (retard) pour 50% de puissance en sortie ou plus	
Injection de courant DC	< 1% du courant de sortie	
	Harmoniques impaires	
	$3 \leq h \leq 9$	4,0 %

b

Courants harmoniques maximums à ne pas dépasser (en % de la fondamentale)	$11 \leq h \leq 15$	2,0 %
	$17 \leq h \leq 21$	1,5 %
	$23 \leq h \leq 33$	0,6 %
	Harmoniques paires	
	$2 \leq h \leq 8$	1,0 %
	$10 \leq h \leq 32$	0,5 %
THD maximum en courant	5,0 %	5,0 %

$$THD_x = \frac{\sqrt{\sum_{h=2,3,\dots} (x_h^2)}}{x_1}$$

Avec :

- THD : Taux de Distorsion Harmonique de la grandeur x (en %)
- h : ordre des harmoniques
- $x_1$  : valeur efficace de la fondamentale
- $x_h$  : valeur efficace de la fondamentale

## 2. Code de l'Atmega328p

```

#include <Arduino.h>

byte Command1 = A0, Command2 = A1, Output1 = 5, Output2 = 6;

const float MainFrequency = 150.0, ConstanteGen = 1, ModFrequency = 62000.0, Pi = 3.14159265358979;

float MainPeriod = ConstanteGen*1000000/MainFrequency;

float ModPeriod = ConstanteGen*1000000/ModFrequency;

float Resolution = Pi/40.0;

int Enable1 = A0, Enable2 = A1;

void setup()
{
    Serial.begin(115200);

    pinMode(Output1, OUTPUT);

    pinMode(Enable1, INPUT);

    pinMode(Enable2, INPUT);

    pinMode(Output2, OUTPUT);

    Serial.println("Hey");

    TCCR0B = TCCR0B & B11111000 | B00000001;
}

void loop()
{
    boolean EnableOne = digitalRead(Enable1);          boolean EnableTwo = digitalRead(Enable2);

    if((!EnableOne) && (!EnableTwo)) { //Serial.println("##### Turned off
#####");

```

```

analogWrite(Output1,0);

  analogWrite(Output2,0);

}

if((!EnableOne) && (EnableTwo)){ // Serial.println("##### Injection
Mode #####");

{

  int InputCommand1 = analogRead(Command1), InputCommand2 = analogRead(Command2), pwm1 =
InputCommand1/3, pwm2 = InputCommand2/3;

  analogWrite(Output1,pwm1);

  analogWrite(Output2,pwm2);

}

}

if((EnableOne) && (!EnableTwo)){ // Serial.println("##### Inverter
Mode #####");

for(float angle = 0; angle < Pi; angle+=Resolution)

{

  if(255*sin(angle) < 100){

    analogWrite(Output1,250*sin(angle));

    analogWrite(Output2,0);}

  else{ analogWrite(Output1,250);

    analogWrite(Output2,0);}

}

for(float angle = 0; angle < Pi; angle+=Resolution)

{

  if(255*sin(angle) < 100){

```

```

analogWrite(Output2,250*sin(angle));

analogWrite(Output1,0);}

else{ analogWrite(Output2,250);

analogWrite(Output1,0);}

}

}

```

### 3. Code du nodeMCU

```

#include <SoftwareSerial.h>

#include <Arduino.h>

#include <Wire.h>

#include <LiquidCrystal_PCF8574.h>

#include <FirebaseESP8266.h> //InstallFirebaseESP8266library

#include <esp8266wifi.h>

#include <ESP8266WiFi.h>

#include <WiFiManager.h>

WiFiManager wm;

const char* ssid = "Smart Inverter";

const char* password = "Deobromacacao";

#define FIREBASE_HOST "compteur-d-energie-default-rtdb.firebaseio.com" //Without<ahref="http://or">http://or</a><ahref="https://schemes">https://schemes</a>

#define FIREBASE_AUTH "cWasjGrJXof35PqnnwXcyj44LutC1vKKyfLtnLmm"

#define R_Up 10

#define R_Down 1

int RST_Pin = D4;

```

```
FirebaseData firebaseData;

FirebaseData DeoCommand;

FirebaseData DeoModeSelected;

FirebaseJson json;

LiquidCrystal_PCF8574 lcd(0x27);

    int show = -1, error, Test = 2000, Time = 1, Time2 = 300, x = 0;

char parole[200];

String UPSSState = "";

int ledState = LOW, string, Voltage = 0, Power, Temperature = 20, Constante = 20, IntensityPin = A0,
IntensitySelected = 20, Mode = 0, countervar = 1;

String sentence = "", UPS = "no datas";

float Intensity = 0;

boolean EndMode = false;

void ToListen()

{

    UPS = ToReadData();

    string = 0;

    while(Serial.available() > 0 && string <= 149)

        {

            parole[string] = Serial.read();

        }

    delay(10);

    string+=1;

    }

parole [string] = '\0';

sentence = parole;
```

```
}  
  
String ToReadData()  
{  
    int DataRead1 = sentence.indexOf("Power ON");  
    if(DataRead1!=-1)  
    {  
        UPSState = "On";  
    }  
  
    int DataRead2 = sentence.indexOf("Power OFF");  
    if(DataRead2!=-1)  
    {  
        UPSState = "Off";  
    }  
  
    int DataRead3 = sentence.indexOf("with temperature");  
    if(DataRead3!=-1)  
    {  
        UPSState = "Components are hot";  
    }  
    return UPSState;  
}  
  
int ToReadValues()  
{  
    String values = sentence;
```

```

float Datas = values.toFloat();

return Datas;

}

void Displaying(){

if(Mode == 2)

{   lcd.clear();           //EndMode = false;

        lcd.setCursor(2, 0);           lcd.print("Mode autonome");

        //lcd.setCursor(10, 0);           lcd.print(Voltage, 0);

        //lcd.setCursor(13, 0);           lcd.print("V");           Serial.println("*****Mode =
2*****");

lcd.setCursor(0, 1);           lcd.print("Sortie: ");

                                lcd.setCursor(10, 1);           lcd.print("220V");

                                lcd.setCursor(13, 1);           lcd.print("V");   delay(200);

}

if(Intensity >= IntensitySelected){ //EndMode = false;   Serial.println("Short circuit");

    lcd.clear();

    lcd.setCursor(0, 1);           lcd.print("Courant de sortie trop elevé");           delay(2500);

    for (int i = 0; i <= 12; i += 1){

        lcd.scrollDisplayLeft(); delay(600);}}

    if(IntensitySelected == 0){

        lcd.clear();   Serial.println("Error");

        lcd.setCursor(0, 1);           lcd.print("Erreur config...");           delay(2500);

    }
}

```

```

else{
if(Voltage <= 200){ //EndMode = false;

lcd.clear(); Serial.println("Input < 200");

lcd.setCursor(0, 0);          lcd.print("Entree: ");
lcd.setCursor(10, 0);         lcd.print(Voltage, 0);
lcd.setCursor(13, 0);         lcd.print("V");

lcd.setCursor(0, 1);

lcd.print("Pas d'injection dans le reseau!"); delay(300);

for (int i = 0; i <= 10; i += 1){

lcd.scrollDisplayLeft(); delay(300);}}

if(Voltage > 230){ //EndMode = false;

Serial.println("Input > 230");

lcd.clear();

lcd.setCursor(0, 0);          lcd.print("Entree: ");
lcd.setCursor(10, 0);         lcd.print(Voltage, 0);
lcd.setCursor(13, 0);         lcd.print("V");

lcd.setCursor(0, 1);

lcd.setCursor(1, 1);          lcd.print("Impossible d'injecter dans le reseau");

for (int i = 0; i <= 15; i += 1){

lcd.scrollDisplayLeft(); delay(300);}}

if((Voltage > 200) && (Voltage < 230)){ Serial.println("Hey, I can use 2 modes"); static byte counter =
0; lcd.clear();

if(Mode == 0)

{ lcd.clear(); counter = 0; //EndMode = false;

lcd.setCursor(0, 0);          lcd.print("Onduleur ");

```

```

        lcd.setCursor(8, 1);          lcd.print("eteint");    Serial.println("*****Mode =
0*****");

        delay(1000);}

if(Mode == 1)

{
    lcd.clear();

    lcd.setCursor(0, 0);          lcd.print("Entree: ");

    lcd.setCursor(10, 0);        lcd.print(Voltage, 0);

    lcd.setCursor(13, 0);        lcd.print("V");          Serial.println("*****Mode =
1*****");

    lcd.setCursor(0, 1);          lcd.print("Injection");

    if(!EndMode){

for(int cnt = 10; cnt <= 13; cnt+=1){

lcd.setCursor(10, cnt);          lcd.print("."); // Serial.println("Boucle");

delay(1500);

}}

lcd.clear();                      EndMode = true;          // Serial.println("End injection loop");

                                lcd.setCursor(0, 1);          lcd.print("Sortie: ");

                                lcd.setCursor(10, 1);          lcd.print(Voltage, 0);

                                lcd.setCursor(13, 1);          lcd.print("V"); }

if(Mode == 2)

{
    lcd.clear();    counter = 0;          //EndMode = false;

    lcd.setCursor(2, 0);          lcd.print("Mode autonome");

    //lcd.setCursor(10, 0);        lcd.print(Voltage, 0);

    //lcd.setCursor(13, 0);        lcd.print("V");          Serial.println("*****Mode =
2*****");

```

```

lcd.setCursor(0, 1);          lcd.print("Sortie: ");

                                lcd.setCursor(10, 1);          lcd.print("220V");
                                lcd.setCursor(13, 1);          lcd.print("V"); delay(200);

                                }}}

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  pinMode(RST_Pin, INPUT_PULLUP);
  Serial.print(Mode+5000);
  while (!Serial)
    ;

    Serial.println("Probing for PCF8574 on address 0x27...");
    Wire.begin();
    Wire.beginTransmission(0x27);
    error = Wire.endTransmission();
    Serial.print("Error: ");
    Serial.print(error);

  if (error == 0){
    Serial.println(": LCD found.");
    show = 0;
    lcd.begin(16, 2);} // initialize the lcd
  else{
    Serial.println(": LCD not found.");}
    lcd.setBacklight(255);

```

```
lcd.home();  
  
lcd.clear();  
  
lcd.setCursor(0, 0);  
  
lcd.print("H");  
  
delay(1000);  
  
lcd.setCursor(1, 0);  
  
lcd.print("e");  
  
delay(1000);  
  
lcd.setCursor(2, 0);  
  
lcd.print("l");  
  
delay(1000);  
  
lcd.setCursor(3, 0);  
  
lcd.print("l");  
  
delay(1000);  
  
lcd.setCursor(4, 0);  
  
lcd.print("o");  
  
delay(3000);  
  
lcd.setCursor(6, 0);  
  
lcd.print("ULPGL");  
  
lcd.setCursor(10, 1);  
  
lcd.print("FSTA");  
  
delay(4000);  
  
lcd.clear();  
  
lcd.setCursor(0, 0);
```

```
        lcd.print("Fait par Deo");

        lcd.setCursor(0, 1);

        lcd.print("Onduleur AssistE");

        delay(2000);

    for (int i = 0; i <= 12; i += 1){

        lcd.scrollDisplayLeft(); delay(600);}

WiFi.mode(WIFI_STA);

delay(1000);

if(!wm.autoConnect(ssid, password)){

    Serial.println("Erreur de connexion");

}

else

{

    Serial.println("Connexion etablie");

}

Serial.println();

Serial.print("ConnectedwithIP:");

Serial.println(WiFi.localIP());

Serial.println();

Firebase.begin(FIREBASE_HOST,FIREBASE_AUTH);

Firebase.reconnectWiFi(true);

}

void loop() {

    Displaying();
```

```

ToListen();

Serial.print(Mode+5000);

int DatasMixed = ToReadValues();

if((DatasMixed >= 100) && (DatasMixed < 200))

{

  Temperature          =          DatasMixed          -          100;
Serial.println("_____
_____Temperature_____"); Serial.println(Temperature);

}

if((DatasMixed >= 1000) && (DatasMixed < 2000))

{

  Voltage              =          DatasMixed          -          1000;
Serial.println("_____
_____Voltage_____"); Serial.println(Voltage);

}

if((DatasMixed >= 8000) && (DatasMixed < 9000))

{

  Intensity            =          (DatasMixed          -          8000)*3;
Serial.println("_____
_____Intensity_____"); Serial.println(Intensity);

}

if(Firebase.setFloat(firebaseData, "/Deo/DeoInputVoltage", Voltage))

{

}

else

{

```

```
}  
  
if(Firebase.setFloat(firebaseData,"/Deo/DeoCurrent",Intensity))  
  
{  
  
}  
  
else  
  
{  
  
}  
  
if(Firebase.setFloat(firebaseData,"/Deo/DeoTemperature",Temperature))  
  
{  
  
Serial.print("Intensity sent: ");Serial.println(Intensity);  
  
*/  
  
}  
  
else  
  
{  
  
}  
  
if(Firebase.getString(DeoCommand,"/Deo/DeoCommand"))  
  
{  
  
if(DeoCommand.stringData()=="1")  
  
{  
  
Serial.print("Turn ON device");  
  
}  
  
else if(DeoCommand.stringData()=="0")  
  
{  
  
Serial.print("Turn OFF device");
```

```
}  
}  
if(Firebase.getString(DeoModeSelected,"/Deo/DeoModeSelected"))  
{  
Mode = DeoModeSelected.stringData().toInt();  
}  
delay(50);  
}
```

#### 4. Photo du prototype

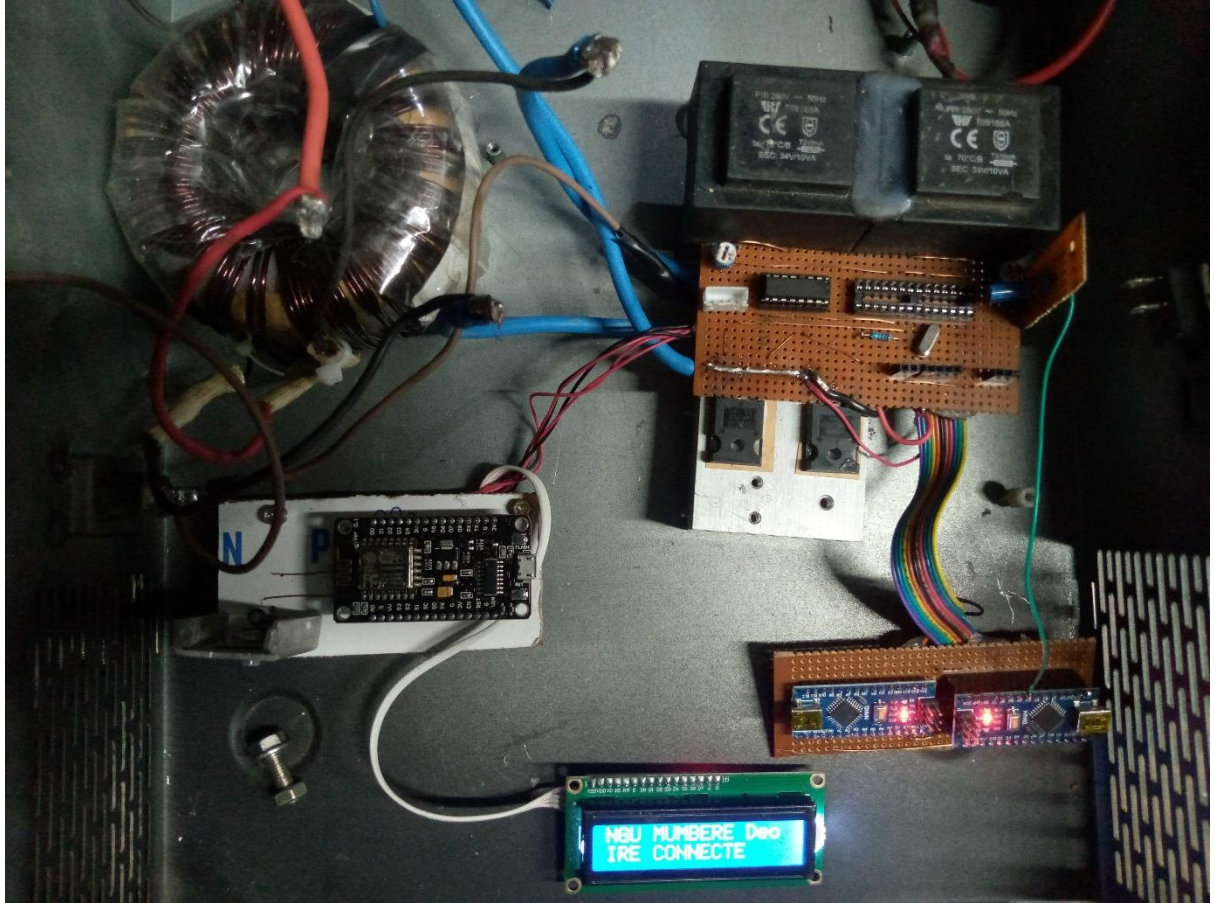


Figure1 Photo du prototype