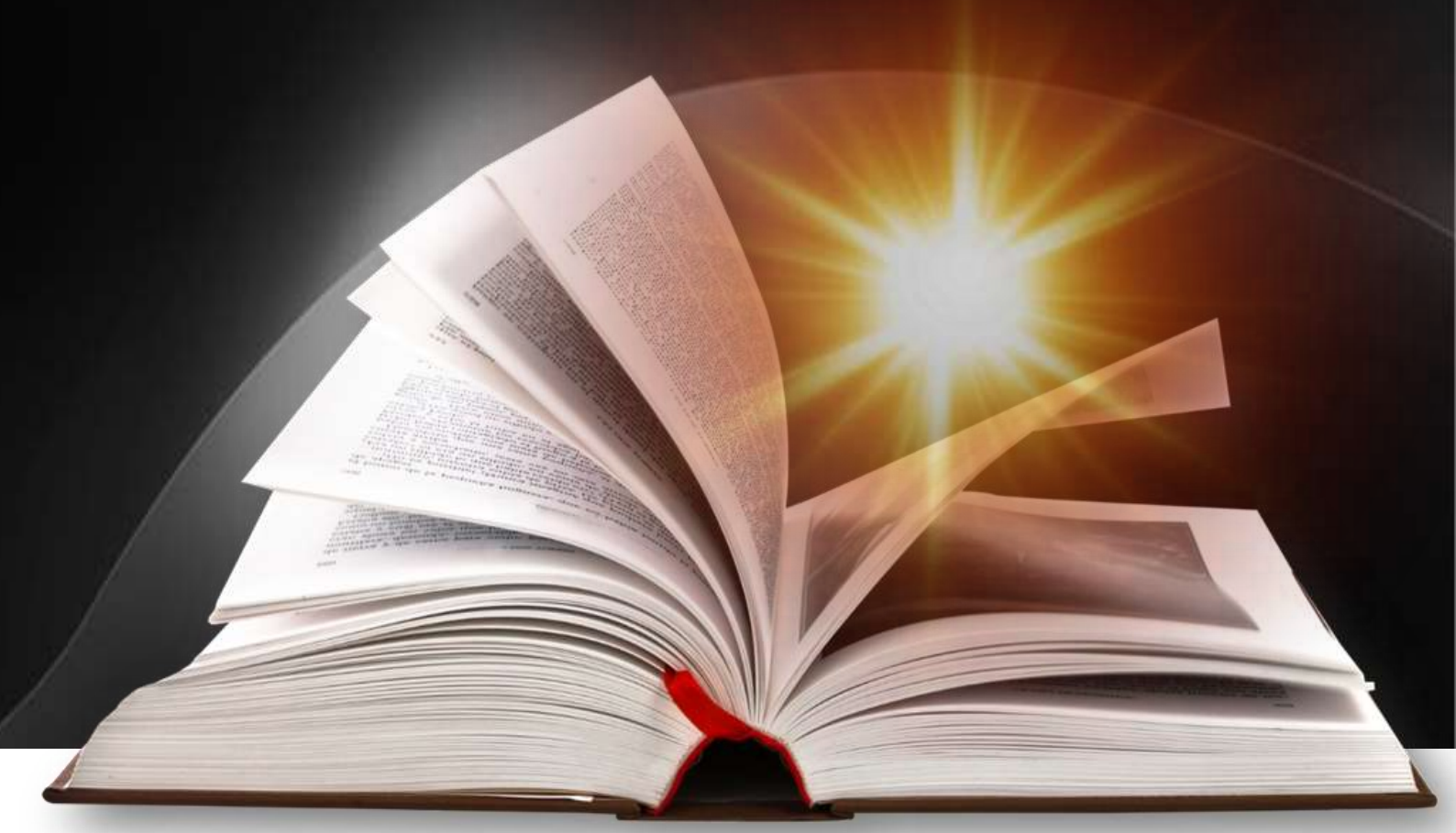
ISSN
: 2790-6248
: 2790-6256

RPJ

Revue Panafricaine de la Jeunesse

- Pan African Youth Journal -



Volume 3, n°2, Mai - Août 2024

EDITIONS LUMUMBA
Un nouvel élan de l'édition africaine

Association Panafricaine pour l'Encadrement et la Formation de la Jeunesse

African Scientific Universe

Afrindala Group

© Editions Lumumba

Conception et prototypage d'un onduleur triphasé commandé par une carte Arduino

[Design and Prototyping of a Three-Phase Inverter Controlled by an Arduino Board]

PALUKU BAYUNDE Evariste
Institut Supérieur Pédagogique Technique (ISPT)-Muhangi/ RD Congo
Email : palukuevariste@gmail.com

ISSN
: 2790-6248
: 2790-6256

RPJ

Revue Panafricaine de la Jeunesse

- Pan African Youth Journal -

DOI : https://doi.org/10.58610/RPJ.2790.6248.6256.31

Editions Lumumba I Afriscience I Association Panafricaine pour l'Encadrement et la Formation de la Jeunesse

EDITIONS LUMUMBA
Un nouvel élan de l'édition africaine

Revue Panafricaine de la Jeunesse (RPJ)
ISSN : 2790-6248
e-ISSN : 2790-6256
© Editions Lumumba - APANAEFJ
Bibliothèque Nationale du Congo I Ordonnance loi n° 89-010
du 11 janvier 1989 – Permis d'implantation n° BNC/DPHK/08/2022

Afrindala Group

La Revue Panafricaine de la Jeunesse (RPJ) est une revue scientifique internationale, interdisciplinaire et interactive. Elle se veut un lieu de diffusion de travaux de recherche originaux et substantiels sur diverses questions liées aux enjeux et défis des sociétés africaines, dans toutes les disciplines scientifiques. La RPJ est enregistrée par le Centre International de l'ISSN (International Standard Serial Number) sous les numéros ISSN : 2790-6256 et e-ISSN : 2790-6248.

Les Éditions Lumumba, sous la houlette du label panafricain Afrindala Group, branche scientifique « Afriscience », sont une maison d'édition établie en RD Congo conformément à l'Ordonnance-Loi n° 89-010 du 11 janvier 1989 et opérant sous le permis d'établissement n° BNC/DPHK/08/2022. Enregistrées auprès de l'Agence Internationale de l'ISBN, par l'intermédiaire de l'Agence Francophone pour la Numérotation Internationale du Livre (AFNIL), les Éditions Lumumba sont repértoriées sous l'identifiant éditeur : 978-2-38489.

Le comité scientifique international, composé d'enseignants et de spécialistes d'Afrique et d'ailleurs, assure une diversité d'expertises et de perspectives. En tant que membre de Crossref, une organisation américaine participant à l'indexation globale du contenu scientifique, les Éditions Lumumba bénéficient d'un préfixe DOI (10.58610) pour attribuer un DOI unique à chaque œuvre éditée. Cela permet aux publications d'être accessibles à des milliers de membres de Crossref et à des centaines d'organisations, y compris des institutions scientifiques et universitaires du monde entier, augmentant considérablement la visibilité et l'impact international des travaux publiés.

Les Éditions Lumumba s'appuient sur un vaste réseau de distributeurs et de partenaires internationaux, incluant des universités, des ONG et de grandes plateformes telles que CAIRN.INFO (la plus grande bibliothèque numérique francophone), DILICOM, OpenEdition Books, la plateforme Afriscience, etc.

© Editions Lumumba

Revue Panafricaine de la Jeunesse

— RPJ —

- Pan African Youth Journal –

Revue scientifique internationale, interdisciplinaire et interactive

Périodicité : avril, août et décembre
Prix du numéro : 30 USD
Abonnement annuel : 100 USD
Version numérique disponible sur : www.afriscience.org

Suivez-nous sur nos réseaux sociaux :
@editionslumumba | @afriscience

Imprimé en République Démocratique du Congo

Tél. (+243) 90 43 370 19
Email : contact@editionslumumba.com
Site web : www.editionslumumba.com
Siège : 10, avenue de la Moto croisement boulevard M'siri, ville de Lubumbashi, RD Congo

Editorial

Chères lectrices, chers lecteurs,

C'est avec un immense enthousiasme et une profonde conviction que nous vous invitons à explorer cet espace de réflexion, où la richesse de l'ingéniosité africaine se marie harmonieusement avec l'excellence académique, donnant naissance à une véritable symphonie de savoirs et d'innovations. Alors que le monde fait face à des défis multiples et complexes, la Revue Panafricaine de la Jeunesse (RPJ) se distingue comme un phare, éclairant les horizons inexplorés de la pensée africaine et universelle.

Nous vous convions à un voyage intellectuel unique, un périple au cœur de la créativité, de la réflexion et de l'engagement, où chaque page s'ouvre sur un monde en constante transformation. Dans cet espace de partage, les idées naissent souvent dans des contextes de résilience, de diversité et d'espoir, et elles y sont célébrées. Ces idées ne se contentent pas d'être le reflet des réalités africaines ; elles sont également le pont qui relie les cultures, reliant le local au global, le particulier à l'universel.

Dans ce numéro, les contributeurs mettent en lumière non seulement la science et l'innovation, mais aussi l'esprit de collaboration et de partage qui caractérise notre communauté de penseurs et de chercheurs venus de tous horizons. Ici, la rigueur scientifique se marie avec la passion, créant un espace vibrant où les voix des scientifiques résonnent, portées par l'engagement de ceux et celles qui œuvrent pour la transformation des sociétés. Les travaux présentés sont autant de témoignages d'un monde en perpétuelle évolution, où les perspectives croisées favorisent une compréhension plus profonde et plus nuancée des enjeux actuels.

À travers les pages de cette revue, le continent africain se dévoile dans toute sa complexité et sa diversité. Trop souvent perçu sous des prismes réducteurs, l'Afrique révèle ici ses multiples facettes, offrant ainsi un regard neuf et éclairant sur ses réalités. Chaque article,

chaque étude est une invitation à repenser ce que nous savons de l'Afrique et à redéfinir sa place dans le monde globalisé, tout en soulignant l'importance de ses contributions à la pensée mondiale.

Notre équipe éditoriale, soutenue par notre comité scientifique, s'engage à offrir une plateforme de qualité, où chaque publication est le fruit d'une collaboration enrichissante entre auteurs et évaluateurs. Ce processus de travail collectif assure non seulement la rigueur et la pertinence des contenus, mais aussi leur potentiel de transformation pour les sociétés africaines et au-delà.

Au fil de votre lecture, nous espérons que vous serez inspiré(e)s non seulement par la profondeur des réflexions et des analyses proposées, mais aussi par la mission qui guide notre revue : celle de positionner l'Afrique au cœur du discours mondial sur l'innovation et la recherche. Ensemble, construisons un avenir où la science africaine éclaire et inspire, non seulement les peuples africains, mais l'ensemble de l'humanité.

Rejoignez-nous dans cette aventure intellectuelle, et laissez-vous saisir par les innombrables possibilités offertes par un continent en effervescence créative et en quête d'un renouveau global.

Bonne lecture et bienvenue dans un monde de découvertes !

L'équipe éditoriale

Equipe de la revue

Comité de rédaction :

- Directeur de Publication : M. le Pr. Basile Mulwani Makelele, RD. Congo
- Rédacteur en chef : M. le Pr. Philippe Kasongo Maloba Tshikala, Belgique
- Rédacteur en chef Adjoint : M. Valery Ngoy Ndala, RD. Congo
- Secrétaire éditorial : William Agbaka, Bénin
- Coordinateur du processus d'adhésion : M. Josué Lwamba, RD Congo
- Gestionnaire administratif : Banon Zinsou Côme, Bénin
- Gestionnaire financière : Clarisse Mwelwa Bilepo, RD Congo
- Coordinateur des partenariats : Fidèle Bukasa Kabwe, RD Congo
- Traducteur en chef : Dr. Fo-Koku D. Woameno, Togo
- Responsable de la publication en ligne : M. Mayou Nkensa, Cameroun

Comité scientifique :

- Dr. Abdoulaye OUEDRAOGO, PhD en Gestion de Projets, Ministère de l'Economie, des Finances et du Plan (MEFP) au Burkina Faso, Burkina Faso
- Dr. Abi-Kaberou Gildas, PhD en Sciences de l'Education, Ecole Normale Supérieure (ENS/Porto-Novo) et à l'Institut de Psychologie de Travail et des Organisations (PTO), Bénin
- Dr. Adaba Koffi Amessou, PhD en Sociologie (Sociologie Politique), Université de Lomé, Togo
- Dr. Adrien Mazanga Nakunyi, PhD en Sciences de l'Education, Université Simon Kimbangu de Lubumbashi, RD Congo
- Dr. Akimou TCHAGNAOU, PhD en Sciences de l'Education et de la Formation, Université André Salifou de Zinder, Niger
- Dr. AMBOMBI EYOLO Azede Espoir, PhD en criminologie, PhD en pédagogie, en psychologie des organisations, Directeur de la chaire MBA, Afrikan campus, Formateur à l'école de police du Congo, Congo Brazza
- Dr. Amoussou Franck, PhD en Linguistique Anglaise Appliquée, Université d'Abomey-Calavi, Bénin
- Dr. Andi Cudai Nur, PhD en Education, Makassar State University, Indonésie
- Dr. Ballo Drisa, PhD en Roman africain, Université des Lettres et des Sciences Humaines de Bamako, Mali

- Dr. Basile Mulwani Makelele, PhD en Psychologie, Université de Lubumbashi, RD Congo
- Dr. Bernard Aristide BITOUGA, PhD en Anthropologie (Anthropologie sociale et culturelle), Université de Douala, Cameroun
- Dr. Bruno Duovany BEKOLO ENGOUDOU, PhD en ethnologie-anthropologie, Université de Douala, Cameroun
- Dr. Carine Nadège BOUMA, PhD en Droit privé, Université de Bamenda, Cameroun
- Dr. Dédé Terence, PhD en Lettres, Université Félix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire
- Dr. Doba SORO, PhD en Anthropologie Sociologie, Université Polytechnique de Man, Côte d'Ivoire
- Dr. Dre NGONO OSSANGO PANGRACE, PhD en Psychologie, Spécialité : Psychologie du développement humain, Université de Yaoundé, Cameroun
- Dr. ESSOME LELE GIslain Arnaud, PhD en Langue et Linguistique espagnoles, option Sémiotique iconotextuelle, Asociación de Cervantistas ECLLA – Études du Contemporain en Littératures, Langues et Arts, UJM Saint-Étienne UFD LLSL – Littératures, Langues et Sciences du Langage, Univ. Maroua, Cameroun
- Dr. Fidélie NTSHIKALA MBUYA, PhD en Psychologie, Université de Kolwezi, RD Congo
- Dr. Fo-Koku D. Woameno, PhD en Littérature et civilisation américaine, Université de Lomé, Togo
- Dr. Gano Nouhou, PhD en Analyse du discours, Université cheikh Anta Diop de Dakar, Sénégal
- Dr. Gninneyo Sylvestre-Pierre NIYA, PhD en Sciences de l'éducation, Spécialité : Politiques éducatives (Éducation inclusive), Ecole Normale Supérieure/Koudougou, Burkina Faso
- Dr. Ilunga Bumute Christian, PhD en Psychologie, Université de Likasi, RD Congo
- Dr. Jean Pierre Kayembe Kayembe, PhD en Chimie, Rhodes University, South Africa
- Dr. Jeef TSHITAMBA KABALA, PhD en Sciences Politiques et Administratives, Université de Lubumbashi, RD Congo
- Dr. José NGOY WA NGOY TWITE, PhD en Psychologie du travail, spécialité : psychopathologie du travail, Université de Kolwezi, RD Congo

- Dr. Kabiena Kuluila Pierre Valery Dieudonné, PhD en Droit, Université Officielle de Mbuji-Mayi, RD Congo
- Dr. Kabuya-Kabeya Sthilobo Hilaire, PhD en Droit, Université Officielle de Mbuji-Mayi, RD Congo
- Dr. Kaniki Wa Cilombo Joseph-Robert, PhD en Droit, Université Officielle de Mbuji-Mayi, RD Congo
- Dr. KONGUE Toyindou, PhD en Géographie, Option Géographie humaine, rurale et économique, Université de Lomé, Togo
- Dr. KONÉ PATRICE M'BÉTIEN, PhD en Criminologie, Université Félix Houphouet Boigny, Côte- d'Ivoire
- Dr. KOUADIO BAYA BOUAKI, PhD en Sociologie, Université Félix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire
- Dr. KOUADIO Yao Adoman Francis, PhD en Sociologie politique, West Africa Social Science Laboratory, Côte- d'Ivoire
- Dr. Lago Blé Angelin, PhD en Histoire, Université Jean-Lorougnon Guede, Côte d'Ivoire
- Dr. Lokossou Bonaventure, PhD en audiovisuel et de l'information, de la communication, Université d'Abomey-Calavi, Bénin
- Dr. Matthias Cinyabuguma, PhD en Economie, Banque mondiale, RD Congo
- Dr. MBANGI MBONZALE, PhD en sciences sociales, Université de Lubumbashi, RD Congo
- Dr. MBULA MUSASA M. Serge Caleb, PhD en Sciences (Géologie du Pétrole), Université Pédagogique Nationale (UPN)/Kinshasa, RD Congo
- Dr. Metsena Ndjavoua, PhD en Histoire des Relations Internationales, Université de Maroua (Cameroun)/ Institut Universitaire de Développement International (IUDI), Cameroun
- Dr. Mohamed Atteyoub H. dit Modibo SIDIBÉ, PhD en Sciences Économiques et de gestion, Université des sciences sociales et de gestion de Bamako, Mali
- Dr. Moussa Coulibaly, PhD en Sciences du langage et de la Communication, Université Assane Seck de Ziguinchor du Sénégal, Sénégal
- Dr. Moussa Dourfaye Abdoul-kadze, PhD en santé, Santé publique, épidémiologie, biostatistique, recherche en santé, Hôpital de référence de Maradi, Niger
- Dr. Nebie Boukary, PhD en Sciences du Langage, Université de Fada N'Gourma, Burkina Faso

- Dr. Ngala Ntumba Peter, PhD en Droit, Université Officielle de Mbuji-Mayi, RD Congo
- Dr. NGOIE KAZIMINGI Patrick, PhD en Sciences de l'Education, Université de Lubumbashi, RD Congo
- Dr. Ngoy Ndombe Alain, PhD en Droit, Université de Lubumbashi, RD Congo
- Dr. Nkongolo Mulami Kapweka Alphonse, PhD en Droit, Université Officielle de Mbuji-Mayi, RD Congo
- Dr. Norbert Aimé MELINGUI AYISSI, PhD en Histoire, Université de Douala, Cameroun
- Dr. Ntita Ntita Jean Christ, PhD en Droit, Université Officielle de Mbuji-Mayi, RD Congo
- Dr. Nyebe Atangana Sandrine, PhD en Sciences de l'Education, Membre du Laboratoire BONHEURS, CY Cergy Paris Université, Cameroun
- Dr. Outéndé TOUNDOU, PhD en Physiologie végétale, Agrophysiologie, fertilisation des sols, Université de Lomé, Togo
- Dr. Philippe KASONGO MALOBA TSHIKALA, PhD en Psychologie, Université de Lubumbashi, Belgique
- Dr. Raymond-Bernard AHOUANDJINOU, PhD en socio-anthropologie, andragogue et juriste, Association Internationale des Sociologues de Langue Française et du Centre d'Etudes et de Recherche en Education et Interventions Sociales pour le Développement (CEREID), Bénin
- Dr. Richard Muimbi Kitumba, PhD en Droit, Université de Kabinda, RD Congo
- Dr. SAIDI Hicham, PhD en sciences économiques et gestion, Université Moulay Ismaïl, FSJES – Meknès, Maroc
- Dr. SIDIBÉ OUSMANE, PhD en Linguistique du Discours, Université de San Pedro, Côte d'Ivoire
- Dr. Tamia Jules-Amstrong, PhD en Psychologie, Spécialité : Psychologie du Travail et des Organisations, Université Félix Houphouët-Boigny, Côte d'Ivoire
- Dr. Xie Huifang, PhD en Sciences de l'Education, Université pédagogique d'Etat du Liaoning, Chine
- Prof. Dr. DIEU LOBA ARNAUD, Professeur titulaire CAMES, Université Félix Houphouet Boigny, Côte d'Ivoire.

Revue Panafricaine de la Jeunesse
Revue scientifique internationale
ISSN : 2790-6248 I e-ISSN : 2790-6256
Editions Lumumba
Un nouvel élan de l'édition africaine
Email : contact@editionslumumba.com
Afriscience
African Scientific Universe

Conception et prototypage d'un onduleur triphasé commandé par une carte Arduino

[Design and Prototyping of a Three-Phase Inverter Controlled by an Arduino Board]

PALUKU BAYUNDE Evariste
Institut Supérieur Pédagogique Technique (ISPT)-Muhangi/ RD Congo
Email : palukuevariste@gmail.com

Résumé

L'article traite de la conception et du prototypage d'un onduleur triphasé contrôlé par une carte Arduino, spécifiquement dans le cadre de l'optimisation de systèmes photovoltaïques. Face à la limitation des ressources énergétiques actuelles, notamment le pétrole, l'accent est mis sur la recherche d'alternatives énergétiques durables comme l'énergie solaire. L'article explore les défis et solutions pour convertir l'énergie photovoltaïque en courant alternatif triphasé, crucial pour alimenter certains équipements électriques. L'étude présente une méthodologie rigoureuse, comprenant des simulations et des expérimentations, pour valider le prototype développé. Les résultats démontrent la faisabilité locale d'un tel onduleur en utilisant des composants standard, confirmant les hypothèses initiales.

Mots-clés : Onduleur, Triphasé, photovoltaïque, Arduino, résistive et inductive.

Abstract

The article discusses the design and prototyping of a three-phase inverter controlled by an Arduino board, specifically within the context of optimizing photovoltaic systems. Given the limitations of current energy resources, particularly oil, the focus is on exploring sustainable energy alternatives such as solar energy. The article explores the challenges and solutions for converting photovoltaic energy into three-phase alternating current, crucial for powering certain electrical equipment. The study presents a rigorous methodology, including simulations and experiments, to validate the developed prototype. The results demonstrate the local feasibility of such an inverter using standard components, confirming the initial hypotheses.

Keywords: Inverter, Three-phase, Photovoltaic, Arduino, Resistive and Inductive.

0. Introduction

Actuellement, la production de l'énergie électrique est basée, en grande partie, sur une ressource limitée (le pétrole). Selon K. Kassmi, M. Hamdaoui1 et F. Olivié, *2007),* les sources du pétrole deviennent de plus en plus rares, pendant que les demandes énergétiques du monde s'élèvent continuellement. Il est estimé que les réserves mondiales seront épuisées

vers 2030 si la consommation n'est pas radicalement modifiée, et au maximum vers 2100 si des efforts sont produits sur la production et la consommation. Etant donné que cette forme d'énergie couvre une grosse partie de la production énergétique actuelle, il s'avère nécessaire de trouver une autre solution pour prendre le relais, la contrainte imposée est d'utiliser une source d'énergie économique et peu polluante car la protection de l'environnement est devenue un point important.

La recherche des ressources d'énergies alternatives est devenue donc une question cruciale de nos jours. Selon le Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes, 2024, beaucoup de recherches scientifiques ont été menées, non seulement, dans le domaine de la production d'énergie nucléaire, mais également dans le secteur des sources d'énergie illimitées, telles que la production d'électricité par le vent et la transformation de l'énergie solaire en énergie électrique.

Dans ce dernier cas, l'optimisation du fonctionnement des systèmes photovoltaïques est un problème d'actualité puisqu'il conduit sûrement à une meilleure exploitation de l'énergie solaire.

Au niveau mondial, le marché des systèmes photovoltaïques connaît, depuis maintenant plus de 10 ans, un taux de croissance très élevé, de l'ordre de 30 à 40% par an.

La conversion de l'énergie photovoltaïque de continu en alternatif a souvent été monophasée alors qu'ils existent des équipements électriques nécessitant un réseau triphasé pour leur alimentation, à par les alimentations industrielles.

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.

Etant donné que ces systèmes photovoltaïques, générateurs d'électricité peuvent être exploités dans différents lieux : électrification des sites isolés, installation dans les bâtiments ou raccordement direct au réseau d'électricité triphasé,…, les problèmes à contourner au cours de notre investigation sont les suivants :

- Est-il possible de créer un réseau triphasé à partir d'un courant continu localement ?
- Quel est le type de système photovoltaïque et la structure de l'onduleur à adopter ?
- Quels sont les interrupteurs utilisables pour cette commande ?

- Quel dispositif nous permettra t-il de commander les interrupteurs électroniques ?

Vu les problèmes ci-dessus, nous hypothétisons les réponses ci-après :

- A partir d'un courant continu du système photovoltaïque, il serait possible de créer un courant alternatif triphasé localement en vue d'alimenter les machines faisant appel au réseau triphasé.
- Le système photovoltaïque alimentant un onduleur de structure avec bus à basse tension alternative pour lequel, un transformateur triphasé permettrait l'adaptation de la tension de l'onduleur à celle nécessaire pour l'alimentation des appareils.
- Les **T**ransistor à **E**ffet de **C**hamp (TEC) ; en anglais **M**étal **O**xyde **S**emi-conducteur **F**ield **E**ffect **T**ransistor (MOSFET) seraient indispensables.
- Un microcontrôleur programmable permettrait la commande des interrupteurs électroniques en tenant compte des caractéristiques d'un courant alternatif triphasé.

L'objectif de notre travail est de concevoir et réaliser localement un onduleur triphasé en vue de présenter un prototype pour système photovoltaïque adapté aux revenus de notre population, vu que le panneau photovoltaïque gagne de plus à plus de la place dans le système énergétique des ménages.

Le prototypage d'un onduleur triphasé fait l'objet de notre recherche en vue de permettre la production d'un courant alternatif triphasé à partir d'un courant continu en provenance des systèmes photovoltaïques pour adapter cette énergie aux équipements électriques triphasés (moteurs triphasés, fours électrique triphasés, …) et de prouver la réalisabilité local d'un onduleur triphasé moyennant des dispositifs usuels.

1. Méthodologie

Pour mener à bien cette étude, nous avons adopté une approche méthodologique rigoureuse, en combinant plusieurs méthodes complémentaires. La méthode analytique nous a permis de décortiquer la structure d'un courant triphasé ainsi que l'architecture de l'onduleur et du système de commande associé. Grâce à la méthode comparative, nous avons pu évaluer différentes stratégies de commande en vue d'optimiser la forme du courant triphasé, en tenant compte des charges résistives et inductives. Enfin, la méthode expérimentale nous a permis de valider nos analyses théoriques en testant les performances du prototype développé.

Ces méthodes sont soutenues par diverses techniques de collecte de données. La technique documentaire a consisté en une recherche approfondie dans des sources variées, incluant des livres, mémoires, articles scientifiques, ainsi que des ressources en ligne. Nous avons également

employé la technique des interviews libres pour recueillir des insights précieux auprès de techniciens expérimentés dans la production d'énergie photovoltaïque. De plus, des descentes sur le terrain ont été effectuées afin de mieux comprendre les besoins des utilisateurs finaux. Notre travail se concentre sur la conception d'un prototype d'onduleur triphasé, piloté par une carte Arduino UNO, dans le contexte spécifique de la ville de Butembo, en République Démocratique du Congo, pour l'année 2024.

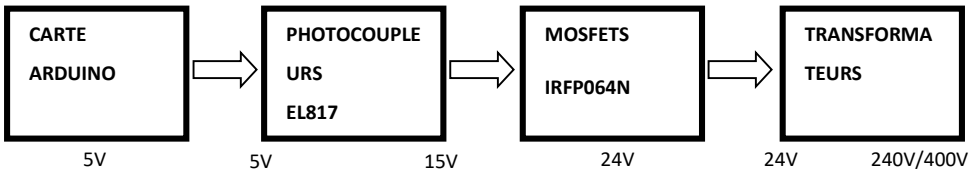
2. Résultats

Dans cette section, nous présenterons les résultats du prototypage. Nous aborderons d'abord le schéma de principe et le dimensionnement, puis le schéma de réalisation et la simulation du fonctionnement. Ensuite, nous décrirons le montage réalisé, avant de conclure par l'interprétation des résultats obtenus et l'estimation des coûts du prototype d'onduleur.

2.1. Schéma bloc de l'onduleur

Notre onduleur se compose de quatre circuits fondamentaux, organisés de la manière suivante : Le signal de commande, généré par la carte Arduino, est d'abord transmis à travers un photocoupleur, assurant l'isolation galvanique entre le microcontrôleur et le circuit de puissance. Ces photocoupleurs permettent également d'adapter le signal de commande au circuit de puissance, qui est composé de MOSFETs.

Figure 1 : Schéma bloc de l'onduleur triphasé à réaliser



Source : notre propre conception

2.2. Dimensionnement de l'onduleur

Pour garantir que les composants de puissance supportent efficacement la charge requise, il est essentiel de les sélectionner en fonction du courant et de la tension qu'ils devront supporter en fonctionnement. La structure que nous avons retenue pour notre réalisation est celle d'un bus à basse tension alternative. Cette configuration nécessite l'utilisation d'interrupteurs ayant une tension d'isolement (claquage) supérieure au double de la tension de fonctionnement, et capables de supporter un courant deux fois supérieur au courant de fonctionnement maximal, correspondant à la puissance nominale de l'onduleur.

Étant donné que cette structure requiert un transformateur élévateur de tension en sortie, fonctionnant à basse fréquence, ce transformateur doit être dimensionné en tenant compte de la puissance de l'onduleur, c'est-à-dire de son courant et de sa tension d'entrée, ainsi que du courant et de la tension de sortie.

1° Circuit de commande de l'onduleur

La carte Arduino, alimentée sous une tension de 5V, génère des impulsions de 5V à ses sorties. Cependant, les MOSFETs nécessitent une impulsion de tension plus élevée. Dans notre cas, nous avons choisi une tension de 15V. Pour ce faire, une interface de commande a été mise en place pour convertir les 5V de la carte Arduino en 15V.

a. La carte Arduino

La carte Arduino est une plateforme programmable basée sur un microcontrôleur, utilisée en informatique embarquée. Elle simplifie le schéma électronique en permettant la mise en œuvre d'un algorithme de commande, capable de remplacer plusieurs circuits traditionnels. Nous avons opté pour la carte Arduino Uno en raison de sa simplicité de programmation et de son excellent rapport qualité-prix sur le marché.

Figure 2 : La carte Arduino Uno



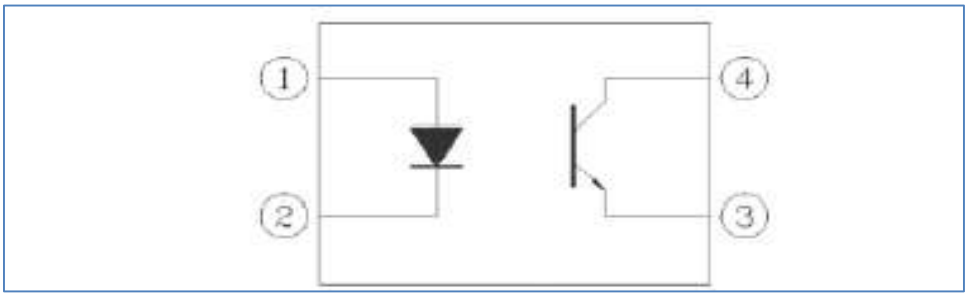
Source : recherche webographique

b. Optocoupleur EL317 :

Un coupleur optique (aussi appelé photocoupleur, optocoupleur ou isolateur optique) est un composant électronique de commande qui permet d'isoler électriquement le circuit de commande du circuit de puissance. Il se compose d'une diode électroluminescente (DEL) comme émetteur et d'un récepteur (qui peut être une photodiode, un phototransistor, un photothyristor ou un phototriac). Dans ce travail, nous utilisons le modèle EL317 pour assurer

l'isolation galvanique entre le circuit de commande et le circuit de puissance. Le schéma interne du EL317 est illustré dans la figure suivante :

Figure 3 : Optocoupleur integré EL317



Source : recherche webographique

La résistance de 2200Ω se place à l'anode de la diode pour la protéger et celle de 100Ω à l'émetteur du transistor pour le connecter à la grille du MOSFET.

c. Choix des régulateurs

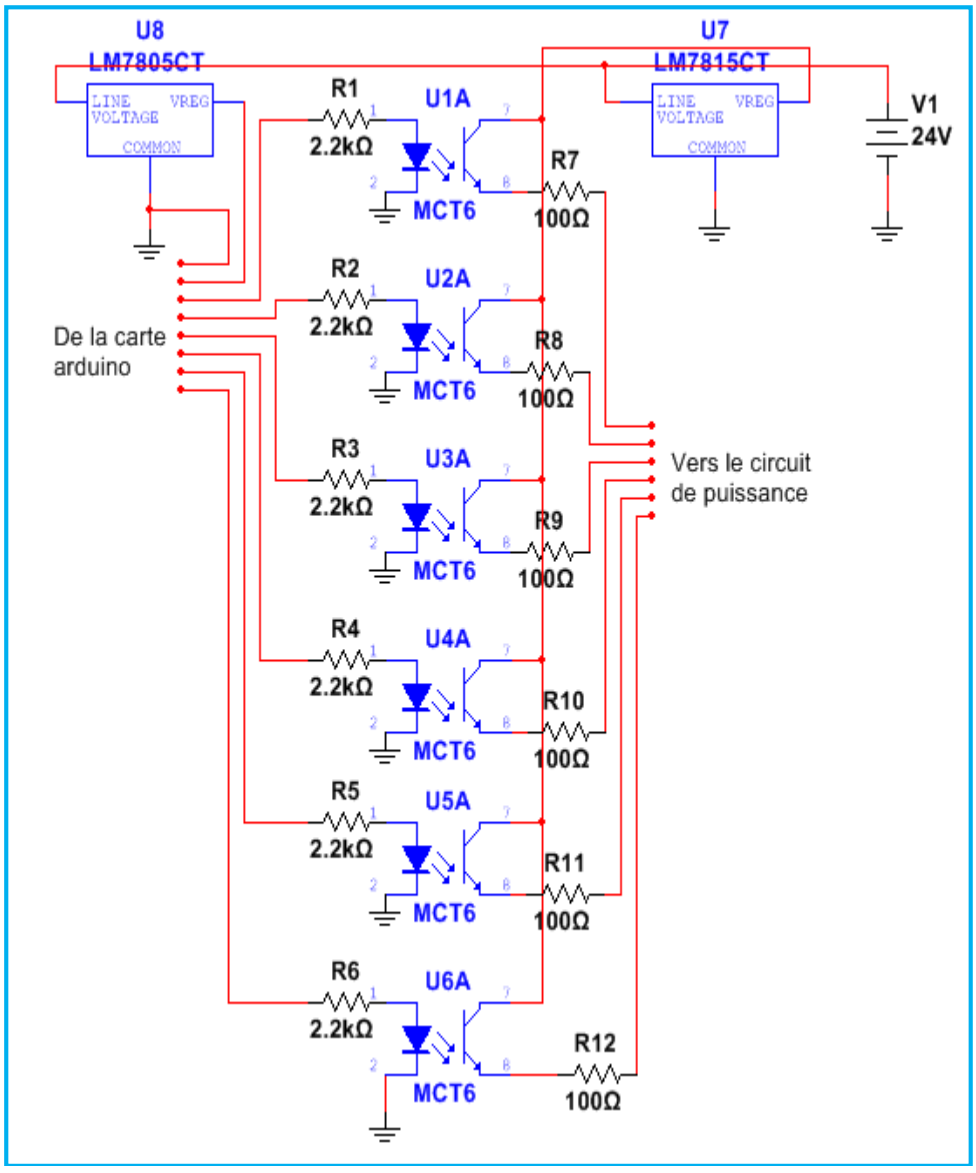
Pour assurer une alimentation stable de la carte Arduino à 5V et du circuit de commande à 15V, il est nécessaire d'utiliser deux régulateurs de tension distincts. Le régulateur LM7805 est dédié à fournir une tension constante de 5V pour la carte Arduino, garantissant ainsi un fonctionnement fiable du microcontrôleur et de ses composants associés. Parallèlement, le régulateur LM7815 est employé pour délivrer une tension stable de 15V au circuit de commande, ce qui est crucial pour le bon fonctionnement des MOSFETs et autres composants nécessitant une tension plus élevée. Le schéma du circuit de commande illustrant cette configuration est présenté ci-après.

Figure 4 : le LM78XX en boitier standard



Source : recherche webographique

Figure 5 : Optocoupleur integré EL317



Source : recherche webographique

2° Circuit de puissance de l'onduleur :

En commençant par la présentation des différents composants impliqués dans sa réalisation, le circuit de puissance de notre onduleur est structuré comme suit :

- Six transistors MOSFETs.
- Six radiateurs avec une résistance thermique de 2°C/W.

- Trois condensateurs (C1, C2, C3) assurant la liaison des sources des transistors Q1, Q3 et Q5 à la masse du point de vue du signal, via les transistors Q2, Q4 et Q6.
- Six résistances (R1, R2, R3, R4, R5, et R6) permettant de relier les grilles aux sources, évitant ainsi l'allumage accidentel des transistors.
- Un condensateur de filtrage (C4) stabilisant la tension aux bornes du montage.
- Un fusible de protection contre les surintensités.

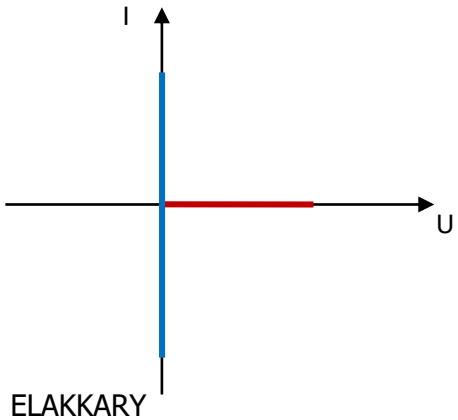
Seul le signal de commande provenant de la carte via les photocoupleurs active les transistors.

a. Choix des interrupteurs :

- **Caractéristique statique des interrupteurs**

Le raisonnement qui permet de déterminer les caractéristiques statique des interrupteurs nécessaires pour un onduleur de tension est le suivant : L'onduleur est réversible en courant pour assurer la circulation bidirectionnelle du courant dans la source. Le courant change de signes lors du fonctionnement permettant la récupération de l'énergie de la source vers l'accumulateur, exemple du freinage par récupération, du fonctionnement à chargeur ainsi que l'auto induction des charges inductives. Ce qui imposent que les interrupteurs choisis soient unidirectionnels en tension et bidirectionnels en courant.

Figure 6 : Caractéristique statique de l'interrupteur à utiliser



Source : P. Ahmed ELAKKARY

- **Le transistor à utiliser**

Les interrupteurs sont des composants électroniques de puissance au semi-conducteur permettant d'interrompre et/ou d'établir le courant dans le circuit à contrôler.

Pour une puissance max de 3kVA chaque bras des transistors commande une puissance de 1000W c'est-à-dire que pour une tension d'entrée de 24V, le courant max du bras est de 41,7A.

$I = \frac{P}{U} => I = \frac{1000}{24} = 41{,}7A$

Dans ce cas, il s'avère nécessaire d'utiliser un interrupteur pouvant supporter le double de ce courant c'est-à-dire au moins 80A.

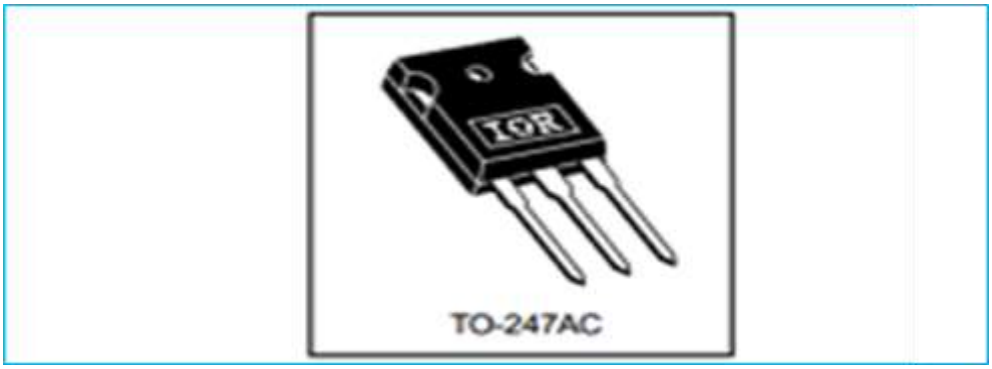
De ce fait, nous allons utiliser les MOSFET IRFP064N ayant comme caractéristiques :

Tableau n°1 : Caractéristiques du MOSFET IRFP064N

Parametre	Symbole	Limite	Unite
Tension Drain Source	V_{DS}	55	V
Tension Grille Source	V_{GS}	± 20	V
Courent Drain V_{GS} =10V Tc = 25 °C	I_D	110	A
Courent Drain V_{GS} =10V Tc = 100°C	I_D	80	A
Puissance max Tc =25°C	P_D	200	W
Courant test	I_{DM}	520	A
Plage de Température	T_J	-55 à 175	°C
Température max		300	°C
Résistance Drain Source ON	R_{DS}(ON)	0,008	Ω
Capacité d'entrée Grille Source	C_{GS}	4	nF
Junction-to-Case	RtJB	0,75	°C/W
Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	RtBR	0,24	°C/W
Junction-to-Ambient	RtJA	40	°C/W

Source : notre propre conception

Figure 7 : Le semi-conducteur IRFP064N (Data sheet, PD - 9.1383A International rectifier IRFP064N)



Source : recherche webographique

- **Le Radiateur**

La cause principale du claquage des composants dans la plupart des cas, c'est l'augmentation de la température.

Avec : R_{DSON}=0,008Ω, nous avons :
$P_D = R \cdot I^2$
$=> P_{Dmax} = 0{,}008 \cdot 41{,}7^2$
$=> P_{Dmax} = 13{,}91W$
Sans dissipateur,
$R_{JA} = 40°C$
$T_J = P_D \cdot R_{JA} + T_A$
$T_J = 13{,}91 \cdot 40 + 20$
$T_{Jmax} = 576{,}4°C$
Sachant que la température ne doit pas dépasser 175°C, il faut monter au dos de chaque MOSFET (IRFP064N) un radiateur dissipateur en aluminium vu sa bonne conductivité thermique.
Avec R_{RA}=2°C/W nous avons :
$R_{JA} = R_{JB} + R_{BR} + R_{RA} = 0{,}75 + 0{,}24 + 2 = 2{,}99$°C/W
$Tj = P_D \cdot R_{JA} + T_A$
$Tj = 13{,}91 \cdot 2{,}99 + 20$
$T_{Jmax} = 81{,}59\ °C$

- **Choix du fusible**

Le fusible est un dispositif permettant d'interrompre le courant dans le système en cas de surintensité causé par la surcharge ou le disfonctionnement interne du système.
Nous l'avons choisi en fonction de l'intensité du courant maximal que peut supporter le circuit de puissance.

$$Imax = \frac{Pmax}{Uentrée} = \frac{3000}{24} = 125\ A$$
$$Ifusible = 1{,}2 \times Imax = 1{,}2 \times 125 = 150\ A$$

- **Choix de la résistance de sécurité Grille Source**

Nous avons prévu une résistance de 10kΩ entre la grille et la source permettant d'empêcher l'allumage accidentel du transistor MOSFET par le bruit externe habituellement au démarrage quand la gâchette n'est pas alimentée.

- **Choix du condensateur de filtrage C4**

Nous avons placé un condensateur électrochimique de filtrage à l'entré du montage en parallèle avec la source afin d'assurer la stabilité de la tension d'entrée.

$$C = \frac{\mathcal{T} \times I}{U \times 2f}$$

$\mathcal{T}$ = Taux d'ondulation max de dix pourcents ;
I = Courant max d'entrée ;
U = La tension d'alimentation ;
f = La fréquence du courant de sortie ;

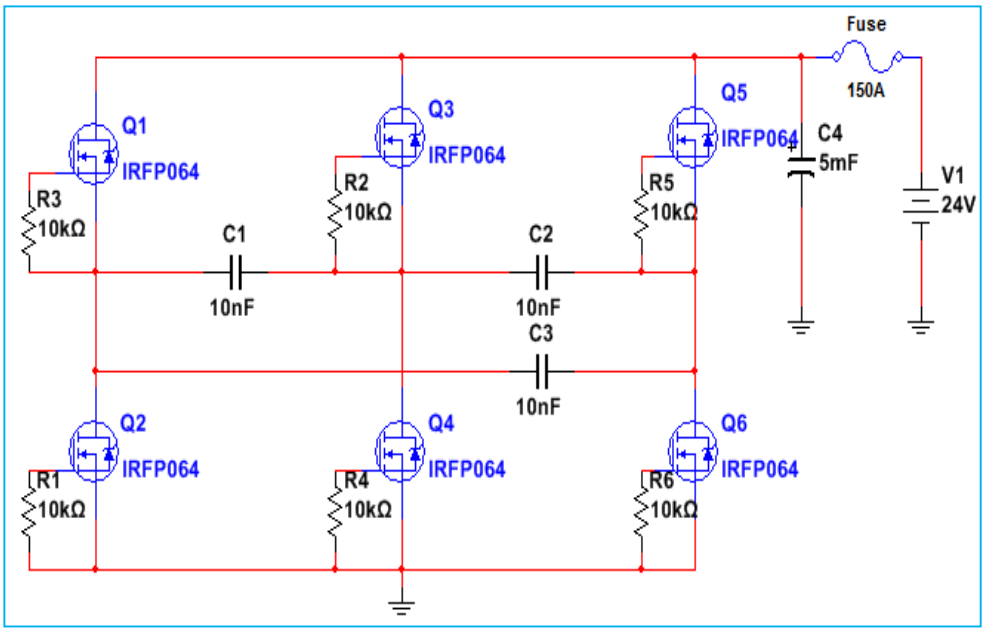
$$C_{min} = \frac{0{,}1 \times 125}{24 \times 2 \times 50} = \frac{12{,}5}{2400}$$
$$= 0{,}0052083333\ F$$
$$= 5208\ uF$$

La tension d'isolement du condensateur doit être supérieure à celle d'alimentation. De ce fait nous avons choisi un condensateur de $50V/5000\ uF$.

- **Choix des condensateurs C1, C2 et C3**

La commande des MOSFETS, pour notre cas, s'effectue par un signal de commande de 15V sur la grille avec la source connectée directement à la masse.
Les transistors T1, T3 et T5 n'étant pas directement connectés à la masse, nous amène à prévoir des condensateurs non polarisés à parallèle avec les sorties des bras des transistors pour assurer une connexion à la masse du point de vu signal de commande à travers les transistors T4, T6 et T2 commandés simultanément avec les premiers.

Figure 8 : Représente le schéma de puissance de l'onduleur triphasé.



Source : recherche webographique

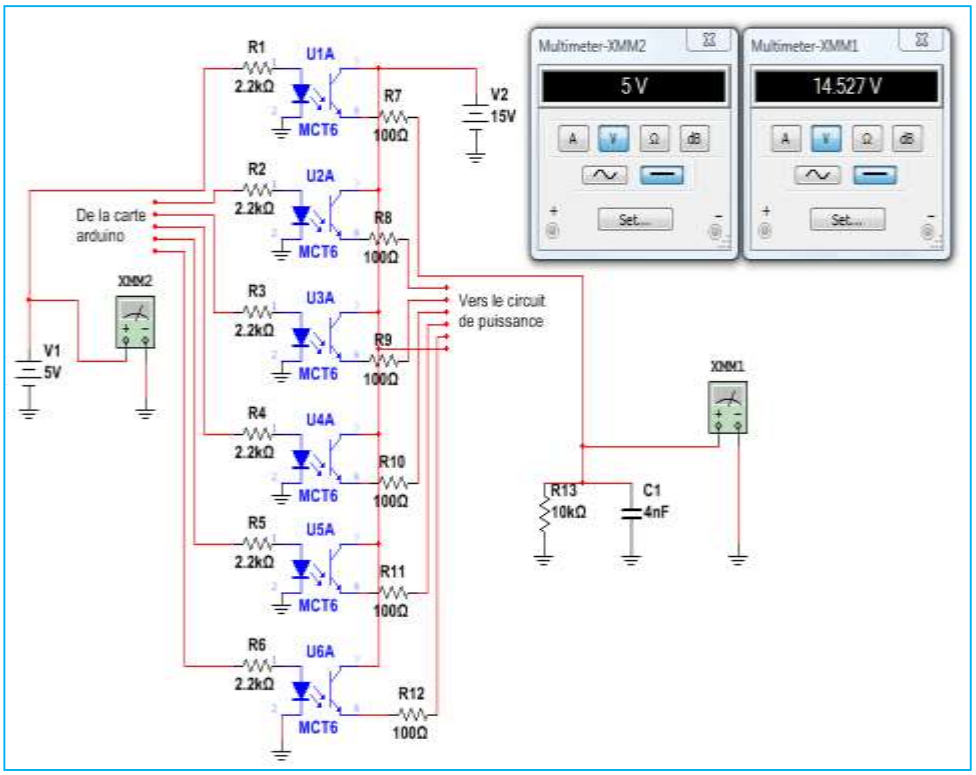
- **Transformateur :**

Le transformateur est un dispositif statique permettant de modifier l'amplitude de la tension d'entré à sa sortie.
Le dimensionnement du transformateur s'effectue en fonction de la puissance à fournir à l'installation, de la tension d'entrée, de celle de sortie et du mode de refroidissement. Pour notre cas, nous allons utiliser trois transformateurs à point milieu de puissance 500VA chacun permettant de transformer une tension d'entrée de 12V à celle de 240V à leurs sorties et tous refroidis par l'air ambiant.

2.3. Simulation du fonctionnement du montage

1° Simulation du fonctionnement du circuit de commande

Nous avons utilisé le logiciel Ni-Multisim pour simuler le fonctionnement du circuit de commande. En mettant à l'entré une tension de 5V, il nous faut avoir à la sortie une tension de 15V.



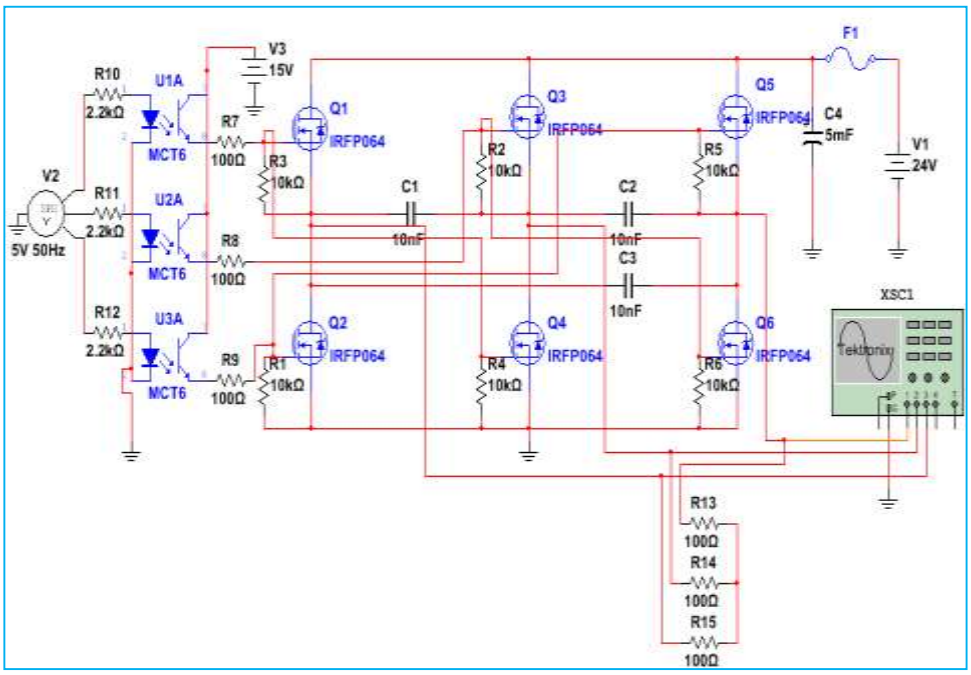
Source : recherche webographique

2° Simulation du fonctionnement du circuit de puissance

Nous avons utilisé le logiciel Ni-Multisim pour tracer et simuler le fonctionnement du circuit de puissance. Alimenté sous une très basse tension

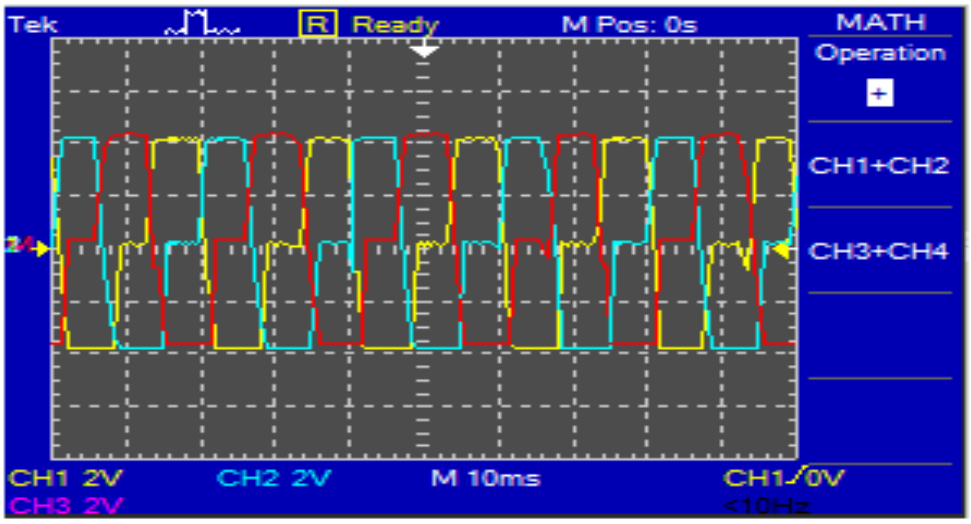
continue, à la sortie nous avons une tension alternative presque sinusoïdale décalée de 120° entre phases. Moyennant un oscilloscope, nous allons visualiser la forme du signal de la tension de sortie.

Figure 10 : Simulation du fonctionnement du circuit de puissance



Source : recherche webographique

Figure 11 : Courbes représentative de la tension avec Ni-Multisim



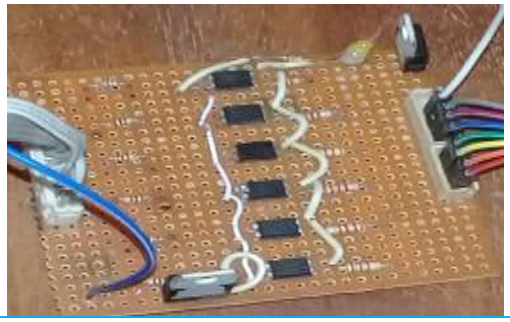
Source : recherche webographique

2.4. Réalisation de l'onduleur

1° Circuit de commande

Le circuit d'interfaçage de la commande situé entre les broches de sortie de la carte arduino et les grilles des Mosfets est constitué des photocoupleurs EL817 protégé à leurs entrés par des résistances de 2200 Ohms et à leurs sorties par ceux de 100 Ohms.
Ce circuit d'interfaçage de la commande est alimenté sous une tension de 15 Volts pour assurer des impulsions efficaces aux grilles des MOSFET.
La figure suivante représente le circuit d'interfaçage de la commande :

Figure 12 : carte électronique d'interfaçage de la commande



Source : recherche webographique

2° Circuit de puissance

Le circuit de puissance est constitué des six transistors de puissance MOSFET IRFP064N monté sur une carte perforée à pistes série. Pour permettre un bon refroidissement nous avons réduit la résistance thermique en prévoyant des radiateurs au dos de chaque transistor. Les résistances montées entre la grille et la source de chaque transistor luttent contre leur allumage accidentel. Les condensateurs de 10nF chacun, montés en triangle sont placés à la sortie du pont triphasé pour permettre la commande des transistors dont les sources sont écartés de la masse.

Figure 13 : carte de puissance



Source : recherche webographique

3° Programmation de la carte Arduino

La commande de notre prototype onduleur est effectuée moyennant une carte Arduino utilisée pour l'implémentation numérique des différents algorithmes de commande. Nous allons procéder à la programmation de la carte Arduino par le l'éditeur de Code Arduino.

De ce fait deux algorithmes sont prévus :

- L'Algorithme de commande pleine onde (180° ou symétrique) ;
- L'Algorithme de commande décalée (120°)

Algorithme de commande pleine onde voir en annexe

Calcul du delay time :

Pour une fréquence de 50Hz, la période est de :

$$T = \frac{1}{50} = 0{,}02\ sec = 2\pi = 360°$$

Le temps de décalage étant de 30° :

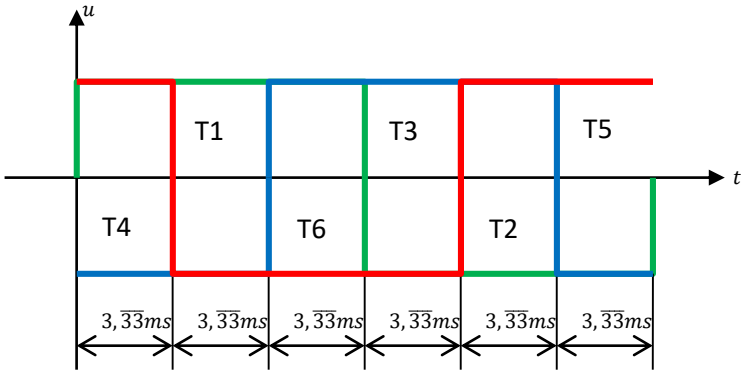
$$Td = 0{,}02 \times \frac{30°}{360°} = 0{,}0016666667\ sec$$

Le double du temps de décalage nous donne la distance entre deux créneaux qui fait :

$$2 \times Td = 2 \times 0{,}0016666667$$
$$= 0{,}003333\ seconde$$
$$= 3{,}333 milisecondes$$
$$= 3333 microsecondes$$

Forme du signal de commande pour une commande symétrique en triphasée :

Figure 14 : signal de commande pour une commande symétrique

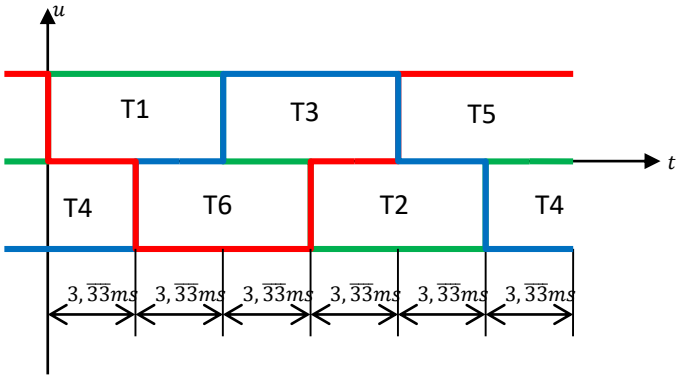


Source : recherche webographique

- Algorithme de commande décalée voir en annexe

Forme du signal de commande pour une commande décalée de 30° en triphasée :

Figure 15 : signal de commande pour une commande décalée

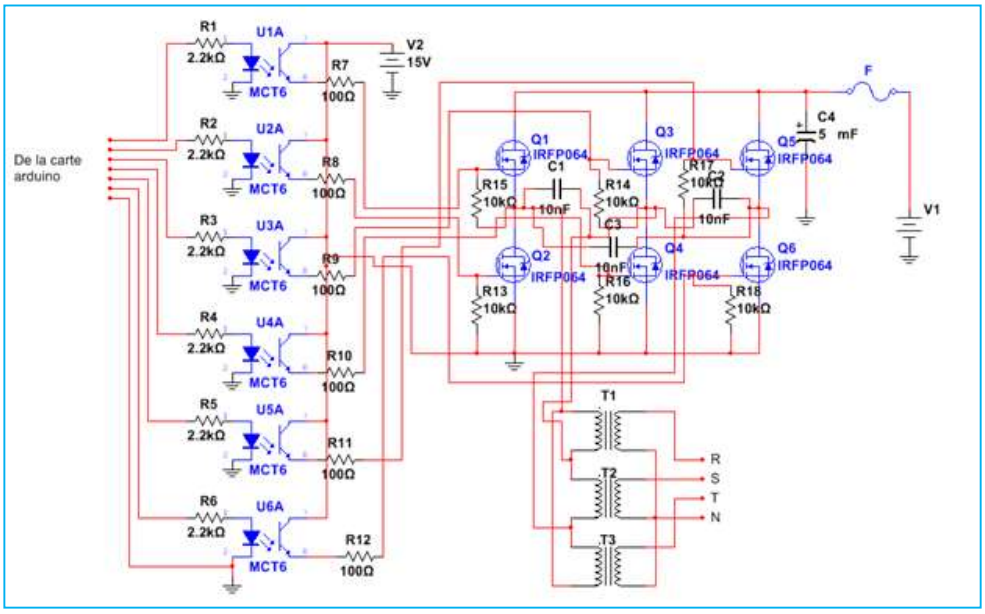


Source : recherche webographique

4. Schéma complet de l'onduleur

Procédons à l'interconnexion des différentes cartes (carte Arduino, carte d'interfaçage de la commande et carte de puissance). La carte de puissance est connectée au circuit d'interfaçage de la commande et le circuit de commande se connecte à la carte Arduino Uno en observant les ports déclarés comme sortie dans notre algorithme. Nous avons 3,5,6,9,10,12 allant vers les photocoupleurs et GND masse. Les trois transformateurs de 500VA chacun sont couplés en triangle au primaire et en étoile au secondaire pour qu'elle se manifeste une tension de 400V entre phases et 240V entre phase et neutre. Représentons ci-après le schéma complet de l'onduleur réalisé :

Figure 16 : Schémas complet de l'onduleur réalisé



5. Cout estimatif de réalisation

Tableau n°1 : Cout estimatif de réalisation

N°	Désignation	Quantité	Prix unit	Prix tot	Observ
1	Carte Arduino	1	15$	15$	UNO
2	Transistors	6	1,5$	9$	IRFP064N
3	Photo coupleurs	6	1$	6$	EL317
4	Résistances	18	0,1$	1,8$	
5	Condensateurs	3	0,2$	0,6$	10nF
6	Condensateur	1	2$	2$	5000uF
7	Radiateurs	6	1$	6$	2°C/W
8	Fils conducteur	5	1$	5$	$10mm^2$
9	Cartes imprimés	2	1$	2$	
10	Transformateurs	3	30$	90$	1000VA
11	Boitier	1	20$	20$	
12	Connecteurs	6	1$	6$	
13	Voltmètres	3	5$	15$	
14	Disjoncteur	1	5$	5$	150A
15	Soudure	1	10$	10$	60/40
16	Imprévues	1		39$	20%
17	Main d'œuvre	1		67,6$	29%
TOTAL				**300 $**	

Source : notre propre investigation

3. Discutions

L'implémentation de la commande symétrique vise à maintenir une forme d'onde équilibrée et stable dans un système triphasé. L'objectif est de garantir que chaque phase du système génère une onde sinusoïdale identique en amplitude, mais déphasée de 120° par rapport aux autres phases.

Impact de la Charge Résistive

Lorsque le système est connecté à une charge purement résistive, comme une résistance chauffante ou une lampe à incandescence, la forme de l'onde produite par le système reste essentiellement intacte. En effet, une charge résistive n'introduit aucune phase supplémentaire ni de déphasage, ce qui signifie que la tension et le courant restent en phase. Par conséquent, la forme d'onde symétrique recherchée par la commande est préservée, assurant un fonctionnement efficace et optimal du système.

Impact de la Charge Inductive

Toutefois, lorsque la charge est inductive, comme un moteur ou un transformateur, l'auto-induction de la charge induit un décalage entre la tension et le courant. Cette auto-induction a pour effet de perturber la forme de l'onde, particulièrement au moment des commutations, c'est-à-dire au début de chaque alternance. Cette perturbation se manifeste par une déformation de l'onde, qui peut devenir moins sinusoïdale et entraîner des pertes d'efficacité ou des problèmes de fonctionnement dans les équipements connectés. Ce phénomène est dû au fait que l'inductance s'oppose aux variations de courant, créant ainsi un retard dans la réponse du système.

Discussion sur l'Implémentation de la Commande Décalée

L'implémentation de la commande décalée est une technique couramment utilisée pour gérer les charges dans un système triphasé, en particulier lorsque les charges sont composées d'éléments résistifs et inductifs (RL).

Charge Résistive

Lorsque la charge est purement résistive, la tension aux bornes de la charge ne subit aucune altération de forme. Cela signifie que la commande décalée permet de maintenir une forme d'onde de tension stable et fidèle à celle générée par l'onduleur. Ceci est particulièrement important dans les applications où la qualité de la tension est cruciale pour le bon fonctionnement des appareils.

Forme de la Tension pour une Charge RL

Dans le cas d'une charge RL, la forme d'onde de la tension et du courant devient plus complexe. La présence de l'inductance dans la charge provoque un déphasage entre la tension et le courant. Néanmoins, malgré ce déphasage, la forme d'onde du courant à la sortie de l'onduleur reste relativement proche d'une sinusoïde, avec une fréquence proche de 50 Hz. Bien que la sinusoïde ne soit pas parfaite, la commande décalée permet de minimiser les distorsions, ce qui est crucial pour maintenir l'efficacité énergétique du système et la stabilité des équipements connectés.

Décalage des Tensions entre Deux Phases

Pour vérifier le décalage des tensions entre deux phases, un oscilloscope avec deux entrées a été utilisé. Bien que cet oscilloscope ne permette de mesurer que deux phases simultanément, il a été possible de vérifier le décalage de phase entre ces deux tensions. Les mesures effectuées ont révélé un décalage de phase proche de 120° entre les deux courbes. Ce résultat est conforme aux attentes dans un système triphasé équilibré, où chaque phase est déphasée de 120° par rapport aux autres. Ce décalage est

essentiel pour le bon fonctionnement des moteurs triphasés et autres équipements qui nécessitent une alimentation triphasée.

Tension d'Alimentation et Tension de Sortie

Le système a été alimenté avec une tension continue de 18V. Après conversion par l'onduleur, la tension de sortie mesurée entre chaque phase et le neutre était proche de 240V. Entre deux phases, la tension mesurée était proche de 400V. Ces valeurs sont typiques d'un système triphasé efficace, où la tension entre phases est environ $\sqrt{3}$ fois supérieure à celle mesurée entre une phase et le neutre. La conversion réussie de 18V DC à des tensions AC élevées démontre l'efficacité du système d'onduleur utilisé, ce qui est crucial pour alimenter des appareils nécessitant une tension triphasée stable et fiable.

4. Conclusion

Cet article traite du prototypage d'un onduleur triphasé piloté par une carte Arduino, construite autour du microcontrôleur ATmega328. L'objectif principal était de surmonter les défis techniques suivants:

- Est-il possible de créer un réseau triphasé à partir d'un courant continu, de manière locale ?
- Quel type de système photovoltaïque et quelle structure d'onduleur sont les plus adaptés pour cette application ?
- Quels interrupteurs électroniques sont les plus appropriés pour assurer un contrôle efficace de l'onduleur ?
- Quel dispositif peut commander ces interrupteurs de manière fiable et précise ?

Dans cet article, nous présentons la méthodologie employée, les résultats obtenus, ainsi que les discussions qui en découlent. Les résultats portent sur la réalisation et l'analyse d'un onduleur triphasé, capable de convertir un courant continu stable en un courant alternatif triphasé. Ce processus comprend plusieurs étapes clés :

1. Élaboration du schéma bloc du système : La conception initiale du système, incluant le dimensionnement et la sélection des composants appropriés.
2. Simulation : Modélisation du fonctionnement de la carte de puissance et de commande à l'aide du logiciel Ni-Multisim pour anticiper le comportement du système.
3. Réalisation : Fabrication de l'onduleur triphasé, en intégrant les composants sélectionnés et en suivant les plans établis.

L'étape cruciale de ce chapitre a été la réalisation physique de l'onduleur triphasé. Nous avons ensuite validé les résultats obtenus grâce à des tests expérimentaux sur des charges variées, en appliquant deux types de commandes : la commande en pleine onde et la commande en onde décalée.

Les hypothèses initiales de cette étude, que nous avons réussi à confirmer, étaient les suivantes :

- Production locale de courant alternatif triphasé : À partir d'un courant continu fourni par un système photovoltaïque, il est possible de créer un courant alternatif triphasé pour alimenter des machines utilisant un réseau triphasé.
- Structure de l'onduleur : Un système photovoltaïque alimentant un onduleur avec un bus à basse tension alternative, où un transformateur triphasé permet l'adaptation de la tension de l'onduleur à celle requise pour les appareils.
- Choix des interrupteurs : Les transistors à effet de champ (TEC), en particulier les MOSFETs (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors), sont essentiels pour la commande des circuits de puissance.
- Commande programmable : L'utilisation d'une carte programmable, comme l'Arduino UNO, est indispensable pour assurer le contrôle précis des interrupteurs électroniques.

En conclusion, notre démarche a abouti à la réalisation d'un prototype fonctionnel d'onduleur triphasé, piloté par une carte Arduino UNO. Ce prototype a démontré la faisabilité de convertir un courant continu en un courant alternatif triphasé, répondant ainsi aux objectifs fixés et ouvrant la voie à des applications potentielles dans l'alimentation des machines nécessitant un réseau triphasé localement.

5. Bibliographie

Christian RIPOLL BOGDAN GRABOWSKI. (2008), *Aide-mémoire Électronique.* Dunod, 5e édition.

Michel PINARD. (2007), *Convertisseurs et électronique de puissance.* Dunod.

Philippe BARRADE. (2006) *L'électronique de puissance méthodologie et convertisseurs élémentaires.* press polytechnique et universitaires, 1ére édition.

BENHADDOUCHE NESRINE FATIMA. (08 Octobre 2013) *La Commande D'un Système Photovoltaïque d'un Satellite*.

CH.MAHER. (2007-2008) *Gestion Energétique des Panneaux photovoltaïque*.

Huang BIN. (14 mai 2009) *Convertisseur continu-continu à rapport de transformation élevé pour application pille à combustible.*

José ANTENOR POMILIO FELLIPE S. GARCIA and Giorgio SPIAZZI. (Août 2013), *Modeling and control design of the interleaved double dual boost converter.* Number vol.60, no.8, pp.3283-3290. IEEE Transaction Industrial Electronics.

Merabet KAMEL. (2011), *Commande MLI d'un onduleur triphasé basée sur la dispersion de la tension triphasée*.

S. RAJASEKARAN D.JEBA Sundari Newlin, R.RAMALAKSHMI. March 14-15, (2013), *A Performance Comparison of Interleaved Boost Converter and Conventional Boost Converter for Renewable Energy Application*. Number 978-1-4673-2594-3/13. IEEE, India.

ABDOUNE Fahim et SAADI Brahim, (2015 / 2016), *Mémoire de master « Réalisation d'un système embarqué d'acquisition de donné pour l'analyse et la diagnostique d'un système photovoltaïque »* à l'Université Abderrahmane Mira – Bejaia, Faculté de la technologie, Département De Génie Electrique, Année Universitaire.

I.Bendjamaa. (2011/2012), *Modélisation et commande d'un système de stockage photovoltaïque*. Mémoire de Magister.

KRAMA Abdelbasset, 2015, Mémoire de master *« Etude et réalisation d'une carte de contrôle par Arduino via le système Androïde »*.

M.N.MCHALIKH et CH.HMADA. (2013), *Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau,* Mémoire de Master.

MECHERI SALAH-EDDINE, (2013/2014), *Mémoire Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master en Electrotechnique « réalisation d'un onduleur de tension monophasé contrôlé par une carte Arduino »* université Constantine i, faculté des sciences de la technologie année académique.

O.BENSEDDIK et F.DJALOUD. (2012), *Etude et optimation du fonctionnement d'un système photovoltaïque*, Mémoire de Master.

Xavier SERPAGGI, (2015), *La plate forme Arduino,* École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Étienne.

6. Annexe

L'Algorithme de commande symétrique est le suivant :

```
int T1=3;
int T2=5;
int T3=6;
int T4=9;
int T5=10;
int T6=12;
void setup() {
pinMode(T1,OUTPUT);
pinMode(T2,OUTPUT);
```

```
pinMode(T3,OUTPUT);
pinMode(T4,OUTPUT);
pinMode(T5,OUTPUT);
pinMode(T6,OUTPUT);
}
void loop() {
digitalWrite(T1,HIGH);
digitalWrite(T2,LOW);
digitalWrite(T3,LOW);
digitalWrite(T4,HIGH);
digitalWrite(T5,HIGH);
digitalWrite(T6,LOW);
delayMicroseconds(3333);
digitalWrite(T1,HIGH);
digitalWrite(T2,LOW);
digitalWrite(T3,LOW);
digitalWrite(T4,HIGH);
digitalWrite(T5,LOW);
digitalWrite(T6,HIGH);
delayMicroseconds(3333);
digitalWrite(T1,HIGH);
digitalWrite(T2,LOW);
digitalWrite(T3,HIGH);
digitalWrite(T4,LOW);
digitalWrite(T5,LOW);
digitalWrite(T6,HIGH);
delayMicroseconds(3333);
digitalWrite(T1,LOW);
digitalWrite(T2,HIGH);
digitalWrite(T3,HIGH);
digitalWrite(T4,LOW);
digitalWrite(T5,LOW);
digitalWrite(T6,HIGH);
delayMicroseconds(3333);
digitalWrite(T1,LOW);
digitalWrite(T2,HIGH);
digitalWrite(T3,HIGH);
digitalWrite(T4,LOW);
digitalWrite(T5,HIGH);
digitalWrite(T6,LOW);
delayMicroseconds(3333);
digitalWrite(T1,LOW);
digitalWrite(T2,HIGH);
```

```
digitalWrite(T3,LOW);
digitalWrite(T4,HIGH);
digitalWrite(T5,HIGH);
digitalWrite(T6,LOW);
delayMicroseconds(3333);
}
```

L'algorithme d'une commande décalée de 30° est le suivant :

```
int T1=3;
int T2=5;
int T3=6;
int T4=9;
int T5=10;
int T6=12;
void setup() {
pinMode(T1,OUTPUT);
pinMode(T2,OUTPUT);
pinMode(T3,OUTPUT);
pinMode(T4,OUTPUT);
pinMode(T5,OUTPUT);
pinMode(T6,OUTPUT);
}
void loop() {
digitalWrite(T1,HIGH);
digitalWrite(T2,LOW);
digitalWrite(T3,LOW);
digitalWrite(T4,HIGH);
digitalWrite(T5,LOW);
digitalWrite(T6,LOW);
delayMicroseconds(3333);
digitalWrite(T1,HIGH);
digitalWrite(T2,LOW);
digitalWrite(T3,LOW);
digitalWrite(T4,LOW);
digitalWrite(T5,LOW);
digitalWrite(T6,HIGH);
delayMicroseconds(3333);
digitalWrite(T1,LOW);
digitalWrite(T2,LOW);
digitalWrite(T3,HIGH);
digitalWrite(T4,LOW);
digitalWrite(T5,LOW);
digitalWrite(T6,HIGH);
delayMicroseconds(3333);
```

```
digitalWrite(T1,LOW);
digitalWrite(T2,HIGH);
digitalWrite(T3,HIGH);
digitalWrite(T4,LOW);
digitalWrite(T5,LOW);
digitalWrite(T6,LOW);
delayMicroseconds(3333);
digitalWrite(T1,LOW);
digitalWrite(T2,HIGH);
digitalWrite(T3,LOW);
digitalWrite(T4,LOW);
digitalWrite(T5,HIGH);
digitalWrite(T6,LOW);
delayMicroseconds(3333);
digitalWrite(T1,LOW);
digitalWrite(T2,LOW);
digitalWrite(T3,LOW);
digitalWrite(T4,HIGH);
digitalWrite(T5,HIGH);
digitalWrite(T6,LOW);
delayMicroseconds(3333); }
```