

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie
Département Ingénierie des Systèmes Electriques
Mémoire de fin d'étude

Présenté par

Redouani Belkacem

Bouaraba Abdelghani

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et informatique industrielle (AII)

Thème

**Commande de variateur de vitesse d'un Moteur
asynchrone triphasé**

Devant le jury composé de :

Présidente	Mme.MILOUDI	M.C.B	U.M.B.B
Examineur	Mr.BELHABCHIA	M.A	U.M.B.B
Promoteur	Mme.KHELOUAT	M.C.B	U.M.B.B

Année Universitaire : 2023/2024

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Je remercie tout particulièrement ma promotrice de mémoire, Madame [L.Khelouat], pour son encadrement et ses précieux conseils. Merci également à l'équipe pédagogique de l'université pour leur enseignement et leur soutien.

Nous remercions également messieurs les membres du jury d'avoir accepté d'évaluer notre travail et de nous honorer de leur présence.

Nos vifs remerciements vont également aux personnels de la centrale thermique de Cap-Djinet pour leur accueil, ainsi que pour nous avoir orientés, aidés et soutenus tout au long de ce travail.

Je suis reconnaissant envers mes collègues et amis, pour leurs encouragements et leur aide. Un grand merci à ma famille, spécialement mes parents, pour leur soutien inconditionnel et leurs encouragements constants.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à ce projet. Votre aide et votre bienveillance ont été d'une grande valeur.

Avec toute ma gratitude,

Dédicaces

Je dédie ce travail à

Mes chers parents, ma mère et mon père, pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements.

Ma sœur et mon frère, pour leur soutien et leur présence.

À ma chère Syrine, pour ta patience infinie, ton amour inconditionnel, ton soutien constant et tes encouragements précieux.

Je tiens à remercier tout particulièrement Ghano, mon partenaire de mémoire et mon binôme. Sans lui, rien n'aurait été pareil.

À mon meilleur ami Yanis, merci d'être toujours là. Ton soutien et ton amitié rendent chaque jour plus beau.

Mon encadreur, Madame L.Khelouat, pour ses conseils et son accompagnement.

Et à tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce modeste travail.

Avec gratitude,

R.Belkacem

Dédicaces

Je remercie avant tout Dieu le Tout-Puissant qui m'a donné la vie, un esprit sain, ainsi que la force et la volonté d'accomplir ce travail.

Je dédie ce modeste travail à mes chers parents, qui ont tout donné pour me voir réussir.

À mes chers frères et sœur, pour leur soutien constant.

À mon binôme, Belkacem, et à tous ceux qui me sont chers.

Je remercie également toutes les personnes qui m'ont aidée de près ou de loin dans la réalisation de ce mémoire.

Avec gratitude,

B.Abdelghani

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I.....	3
PRÉSENTATION DE LA CENTRALE THERMIQUE DE CAP-DJINET.....	3
I.1 Introduction.....	3
I.2 Présentation de l'entreprise SONELGAZ.....	3
I.2.1 Activités de SONELGAZ.....	3
I.2.1.1 La production.....	3
I.2.1.2 Le transport.....	4
I.2.1.3 Distribution d'électricité et de gaz.....	4
I.3 Centrale thermique à vapeur de CAP-DJINET.....	4
I.3.1 Présentation de la centrale.....	4
I.3.2 Historique.....	5
I.3.3 Constitution de la centrale.....	5
I.3.3.1 Générateur de vapeur (chaudière).....	6
I.3.3.2 La Turbine.....	8
I.3.3.3 L'alternateur.....	9
I.3.3.4 Le transformateur.....	10
I.3.3.5 Le poste d'eau.....	11
I.3.3.6 Les différents auxiliaires.....	12
I.3.3.7 La station de traitement de l'eau de mer.....	12
I.3.3.8 Système de surveillance d'alarme et d'analyse.....	13
I.3.4 Principe de fonctionnement de la centrale thermique.....	14
I.4 Conclusion.....	15
CHAPITRE II	16
ETUDE GÉNÉRALE DE LA POMPE ALIMENTAIRE ET DU VARIATUR DE	
VITESSE.....	16
II.1 Introduction.....	16
II.2 La pompe alimentaire.....	16
II.2.1 Le rôle de la pompe alimentaire.....	16
II.2.2 Emplacement de la pompe alimentaire.....	16
II.2.3 Les composants d'une pompe alimentaire.....	16
II.2.3.1 Pompe nourricière.....	17
II.2.3.2 Un moteur asynchrone triphasé.....	17
II.2.3.2.1 Constitution du moteur asynchrone.....	18
II.2.3.2.2 Principe de fonctionnement du moteur asynchrone triphasé.....	19
II.2.3.3 Pompe principale.....	19
II.2.3.4 Un variateur de vitesse hydraulique.....	20
II.3 Étude de nouvel variateur de vitesse.....	21
II.3.1 Principe de base du variateur de vitesse.....	21
II.3.1.1 Le redresseur.....	22

II.3.1.2	Le circuit intermédiaire.....	22
II.3.1.3	L'onduleur.....	23
II.3.2	Les fonctions du variateur de vitesse.....	24
II.3.3	Avantages et inconvénients du variateur de vitesse.....	25
II.3.3.1	Les avantages du variateur de vitesse.....	25
II.3.3.2	Inconvénients du variateur de vitesse.....	25
II.4	Conclusion.....	25
CHAPITRE III		26
CONTRÔLE DU VARIATEUR DE VITESSE DE LA MACHINE ASYNCHRONE		
TRIPHASÉ.....		26
III.1	Introduction.....	26
III.2	Présentation du logiciel « PSIM ».....	26
III.3	Simulation du système : variateur de vitesse avec moteur.....	26
III.3.1	Réseau d'alimentation du variateur de vitesse.....	27
III.3.2	L'étage redresseur.....	28
III.3.3	L'étage de filtrage.....	29
III.3.4	L'étage onduleur.....	30
III.3.4.1	Commande pleine onde (180°).....	30
III.3.4.2	Commande MLI d'une machine asynchrone.....	36
III.4	Conclusion.....	40
CHAPITRE IV		41
CONCEPTION ET RÉALISATION D'UN VARIATEUR DE VITESSE POUR UN		
MOTEUR ASYNCHRONE TRIPHASÉ.....		41
IV.1	Introduction.....	41
IV.2	Généralités sur les cartes Arduino.....	41
IV.2.1	Présentation.....	41
IV.2.2	Spécifications techniques.....	42
IV.3	Simulation du programme sur PROTEUS.....	43
IV.3.1	Organigramme du programme Arduino.....	43
IV.3.2	Schéma de simulation.....	43
IV.3.3	Résultats de simulation.....	44
IV.3.3.1	Vitesse maximale.....	45
IV.3.3.2	Vitesse moyenne.....	46
IV.3.3.3	Vitesse minimale.....	47
IV.4	Conception et réalisation pratique.....	48
IV.4.1	Choix des composants électroniques.....	49
IV.4.1.1	Carte de commande.....	49
IV.4.1.2	Routage de la carte de commande.....	55
IV.4.1.3	Carte de puissance.....	59
IV.4.1.4	Routage de la carte de puissance.....	60
IV.4.1.5	Routage de la carte d'affichage.....	64
IV.4.2	Réalisation pratique.....	65
IV.4.2.1	Carte de commande.....	65
IV.4.2.2	Carte de puissance.....	66

IV.4.2.3	Carte d'affichage.....	67
IV.4.2.4	Boitier du variateur.....	68
IV.4.2.4.1	Plan de réalisation du boitier.....	68
IV.4.2.4.2	Fixation des cartes et câblages.....	68
IV.5	Etude économique.....	69
IV.6	Conclusion.....	71
	CONCLUSION GENERALE	72
	Références bibliographiques.....	74
	Annexe.....	75
	Annexe 1.....	75
	Annexe 2.....	77
	Annexe 3.....	79
	Résumé.....	81

Liste des figures

Figure I.1 : Logo SONELGAZ.....	3
Figure I.2 : Schéma d'une tranche thermique.....	6
Figure I.3 : Chaudière de la centrale de Cap Djinet.....	7
Figure I.4 : Images des trois corps de la turbine à vapeur.....	9
Figure I.5 : L'alternateur de la centrale.....	10
Figure I.6 : Transformateur	11
Figure I.7 : Salle de commande.....	13
Figure I.8 : Principe de fonctionnement de la centrale thermique.....	14
Figure I.9 : les trois phases de la production de l'énergie.....	14
Figure II.1 : Les composants d'une pompe alimentaire.....	17
Figure II.2 : Pompe nourricière.....	17
Figure II.3 : Moteur asynchrone triphasé.....	18
Figure II.4 : Pompe principale.....	19
Figure II.5 : Schéma du variateur de vitesse hydraulique.....	20
Figure II.6 : Schéma du variateur de vitesse.....	21
Figure II.7 : Schéma du redresseur à base de diodes.....	22
Figure II.8 : Schéma intermédiaire.....	23
Figure II.9 : Schéma de l'onduleur triphasé.....	23
Figure II.10 : Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé.....	24
Figure III.1 : Schéma électrique du variateur de vitesse du moteur asynchrone triphasé sur PSIM.....	27
Figure III.2 : Réseau triphasé équilibré.....	27
Figure III.3 : Les signaux des tensions V1, V2 et V3.....	28
Figure III.4 : Etage redresseur.....	28
Figure III.5 : La tension redressée.....	29
Figure III.6 : Filtre type LC.....	29
Figure III.7 : Simulation de la tension filtrée.....	30
Figure III.8 : Schéma de principe du moteur commandé en pleine onde.....	31
Figure III.9 : Les signaux de commande K1, K2 et K3.....	32
Figure III.10 : Branchement des voltmètres pour l'évaluation des tensions composées entre phases U12, U13 et U23.....	32
Figure III.11 : Allures des tensions composées U12, U13 et U23.....	33
Figure III.12 : Branchements des voltmètres sur les phases.....	34
Figure III.13 : Les tensions simples V1s, V2s et V3s.....	34
Figure III.14 : Branchement des ampèremètres.....	35
Figure III.15 : Allures des courants I1, I2 et I3.....	35
Figure III.16 : Schéma du principe du moteur avec commande MLI.....	36
Figure III.17 : Porteuse triangulaire haute fréquence.....	36
Figure III.18 : Simulation du signal porteuse.....	37
Figure III.19 : Simulation des tensions de référence V1n, V2n et V3n.....	37

Figure III.20 : Principe de la commande MLI à porteuse en dents de scie.....	38
Figure III.21 : Les signaux de commande K1,K2 et K3.....	38
Figure III.22 : Tracés des tensions composées U12, U13 et U23.....	39
Figure III.23 : Tracés des tensions simples V1s, V2s et V3s.....	39
Figure III.24 : Allures des courants I1,I2 et I3.....	40
Figure IV.1 : Carte Arduino Mega.....	42
Figure IV.2 : Organigramme du programme Arduino.....	43
Figure IV.3 : Schéma de simulation du programme sur PROTEUS.....	44
Figure IV.4 : Les 6 signaux de commande PWM avec Vitesse maximale.....	45
Figure IV.5 : Les 6 signaux de commande PWM avec Vitesse moyenne.....	46
Figure IV.6 : Les 6 signaux de commande PWM avec Vitesse minimale.....	47
Figure IV.7 : Schéma synoptique.....	48
Figure IV.8 : Plaque signalétique du moteur asynchrone triphasé.....	49
Figure IV.9 : Alimentation 5V DC.....	50
Figure IV.10 : Bornier à 2 vis.....	50
Figure IV.11 : Régulateur de tension 7805.....	51
Figure IV.12 : Connecteurs headers mâles.....	51
Figure IV.13 : Schéma électronique de la Carte de commande.....	52
Figure IV.14 : Connexion entrées/sorties Arduino.....	53
Figure IV.15 : Isolation galvanique par six (06) optocoupleurs PC817.....	54
Figure IV.16 : driver IR2110.....	55
Figure IV.17 : Schéma du montage de la carte de commande.....	56
Figure IV.18 : Routage de la carte de commande.....	57
Figure IV.19 : Typon de la carte de commande.....	58
Figure IV.20 : IGBT IRG4PC40W.....	59
Figure IV.21 : Schéma électronique de la carte de puissance.....	60
Figure IV.22 : Schéma du montage de la carte de puissance.....	61
Figure IV.23 : Routage de la carte de puissance.....	62
Figure IV.24 : Typon de la carte de puissance.....	63
Figure IV.25 : Schéma du montage de la carte d'affichage.....	64
Figure IV.26 : Routage et typon de la carte d'affichage.....	64
Figure IV.27 : Face des composants de la carte de commande.....	65
Figure IV.28 : Face soudure de la carte de commande.....	65
Figure IV.29 : Face des composants de la carte de puissance.....	66
Figure IV.30 : Face soudure de la carte de puissance.....	66
Figure IV.31 : Face des composants de la carte d'affichage.....	67
Figure IV.32 : Face soudure de la carte d'affichage.....	67
Figure IV.33 : Plan de réalisation du boîtier.....	68
Figure IV.34 : Fixation des cartes et câblages.....	68
Figure IV.35 : Photo du variateur.....	69

Table des illustrations

Tableau I.1 : Caractéristique de la chaudière.....	7
Tableau I.2 : Caractéristique de la Turbine.....	9
Tableau I.3 : Caractéristique de l'alternateur.....	10
Tableau II.1 : Caractéristiques techniques de moteur.....	18
Tableau III.1 : Les tensions composées et signaux de commande.....	33
Tableau IV.1 : Etude économique.....	69

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction générale

Les moteurs asynchrones triphasés représentent plus de 80% du parc moteur électrique. Ils sont utilisés pour transformer l'énergie électrique en énergie mécanique grâce à des phénomènes électromagnétiques. De nos jours, ces machines remplacent de plus en plus les machines à courant continu dans la plupart des applications nécessitant des entraînements à vitesse variable. L'utilisation du variateur de vitesse est répandue dans de nombreux domaines industriels, soit pour régler le processus, soit pour fixer le point de fonctionnement, optimisant ainsi la compétitivité des produits de l'usine.

L'objectif de ce projet est de résoudre un problème rencontré par la centrale électrique de Ras Djinet avec la pompe alimentaire, qui est responsable de fournir de l'eau à la chaudière à une pression de 140 bar. Cette pompe est composée d'un moteur, d'une pompe nourricière, d'un coupleur hydraulique (variateur hydraulique) et d'une pompe principale.

Les principaux obstacles identifiés incluent les pannes du coupleur hydraulique et les dysfonctionnements affectant la fiabilité du système, dus à la nature complexe et sensible du système hydraulique. Ces pannes entraînent des interruptions de production coûteuses, soulignant ainsi la nécessité d'une maintenance et d'une surveillance périodiques. En outre, le coût élevé de cette pompe, tant à l'achat qu'à l'exploitation, accentue l'importance d'assurer son bon fonctionnement.

La solution proposée consiste à remplacer le coupleur hydraulique par un variateur de vitesse électrique, qui permettrait de contrôler la vitesse du moteur en ajustant la fréquence de la tension d'alimentation. Notre rapport est structuré en quatre chapitres qui reflètent la démarche adoptée pour le développement de ce projet :

Le Chapitre I intitulé "Présentation de l'entreprise SONELGAZ", décrit l'entreprise et la problématique de la centrale thermique à vapeur de CAP-DJINET. Il inclut l'historique, la constitution et le principe de fonctionnement de la centrale.

Le Chapitre II dont le titre est "Étude générale de la pompe alimentaire et du variateur de vitesse", couvre le rôle, l'emplacement, les composants de la pompe alimentaire, ainsi que le nouvel variateur.

Le Chapitre III nommé "Contrôle du variateur de vitesse de la machine asynchrone triphasée", présente la simulation du système utilisant le logiciel PSIM, en détaillant les étapes de simulation et les performances des différents types de commande.

Le Chapitre IV dont le titre est "Conception et réalisation d'un variateur de vitesse pour un moteur asynchrone triphasé", décrit la conception, la simulation sur PROTEUS et la réalisation pratique du variateur de vitesse utilisant une carte Arduino.

Le projet se termine par une "Conclusion générale et perspectives", présentant une synthèse du travail et les perspectives d'amélioration.

CHAPITRE I

Présentation de la Centrale

Thermique Cap Djinet

I.1 Introduction

Dans ce premier chapitre, une brève présentation de l'entreprise Sonelgaz et une description générale de la centrale thermique de CAP-DJINET seront données.

I.2 Présentation de l'entreprise SONELGAZ

'SONELGAZ', acronyme de la Société nationale de l'électricité et du gaz, se distingue par sa gestion intégrale du secteur énergétique en Algérie, englobant la production, la distribution et la commercialisation de l'électricité, ainsi que l'achat, le transport, la distribution et la commercialisation du gaz naturel. En tant que leader du marché, cette entreprise garantit un approvisionnement fiable en électricité à environ 11,4 millions de clients et en gaz naturel à environ 7,3 millions de clients à travers le pays. Elle était fondée en remplacement de l'entité précédente Électricité et gaz d'Algérie (EGA) en 1969.



Figure I.1 : Logo SONELGAZ[1].

I.2.1 Activités de SONELGAZ

L'entreprise SONELGAZ est composée de trois branches d'activités qui sont les suivantes :

I.2.1.2 La production

Cette branche consiste à transformer l'énergie calorifique ou hydraulique en énergie mécanique puis électrique. Le parc de production dont les ouvrages sont conçus et dimensionnés pour répondre à un niveau maximum de la demande, comprend quatre filières : Filière Turbines à Vapeur, Filière Turbines à Gaz, Filière Hydraulique, Filière Diesel.

En 2022, Sonelgaz - Production de l'Electricité exploite et assure la maintenance de 59 centrales de différentes filières de production de l'électricité :

- 05 Centrales thermique à Vapeur (TV) parmi lesquelles la centrale de CAP-DJINET.
- 30 Centrales thermique à Gaz (TG).
- 14 Centrales Turbines à Gaz Mobiles (TGM).

- 06 Centrales Cycles Combinés (CC).
- 04 Centrales Turbines Hydrauliques (TH).

I.2.1.2 Le transport

La branche du transport quant-à-elle se divise en transport de l'électricité et le transport du Gaz :

- Le transport de Electricité est réalisé à partir des lignes haute tension et permet de se rapprocher des consommateurs finaux (gros clients industriels et postes de distribution).
- Le transport de Gaz naturel se fait en haute pression par canalisation aux fins de mise à disposition des abonnés industriels et domestiques.

I.2.1.3 Distribution d'électricité et de gaz

À travers son réseau de transmission et de distribution, SONELGAZ assure la fourniture fiable d'électricité et de gaz à travers le pays.

I.3 Centrale thermique à vapeur de CAP-DJINET

I.3.1 Présentation de la centrale

La centrale thermique de Cap-Djinet est une installation de production d'électricité qui utilise le gaz naturel comme combustible. Ce gaz est brûlé dans des chaudières spéciales, générant ainsi une chaleur intense. Cette chaleur est utilisée pour chauffer de l'eau et la transformer en vapeur à haute pression. La vapeur ainsi produite est dirigée vers une turbine, où sa force fait tourner les pales de la turbine à grande vitesse. La turbine est connectée à un alternateur, qui convertit l'énergie cinétique de la turbine en énergie électrique. Ce processus permet de générer une quantité importante d'électricité qui est ensuite distribuée aux consommateurs par le réseau électrique.

Cette centrale a été construite de 1980 à 1986 dans le but d'augmenter la production d'électricité du pays.

I.3.2 Historique

En 1980, les principaux contrats ont été signés pour la construction de la centrale thermique de Cap-Djinet. Les travaux de terrassement ont débuté en mars 1981, suivis du montage de la centrale en mars 1984. Cette centrale a été mise en service progressivement, par groupes de générateurs, après plusieurs années de construction :

- Groupe 01 : Couplage sur réseau le 17 juin 1986.
- Groupe 02 : Couplage sur réseau le 17 septembre 1986.
- Groupe 03 : Couplage sur réseau le 29 novembre 1986.
- Groupe 04 : Couplage sur réseau le 21 février 1987.

La centrale de Ras-Djinet a contribué à renforcer la capacité de production d'énergie électrique en 1986 avec une puissance de 672MW. Elle est constituée de 4 groupes, chacun ayant une puissance de 176 MW.

I.3.3 Constitution de la centrale

La centrale thermique de Cap-Djinet est composée de plusieurs éléments essentiels pour la production d'électricité, à savoir :

- Un générateur de vapeur (chaudière).
- Une turbine à vapeur.
- Un alternateur.
- Une station de pompage d'eau de mer.
- Un poste de détente gaz naturel.
- Un poste de production d'eau dessalée.
- Un poste de production d'hydrogène.
- Un poste fuel.
- Un poste d'eau, composé d'un condenseur, deux (02) pompes d'extraction, trois (03) pompes alimentaires, trois (03) réchauffeurs BP (basse pression) et deux (02) réchauffeurs HP (haute pression) et une bache alimentaire équipée d'un dégazeur de l'eau du cycle.
- Une station d'électro-chloration.
- Un poste de stockage et traitement des huiles.
- Un transformateur principal d'évacuation de l'énergie.

- Une salle de commande.
- Des Auxiliaires électriques.

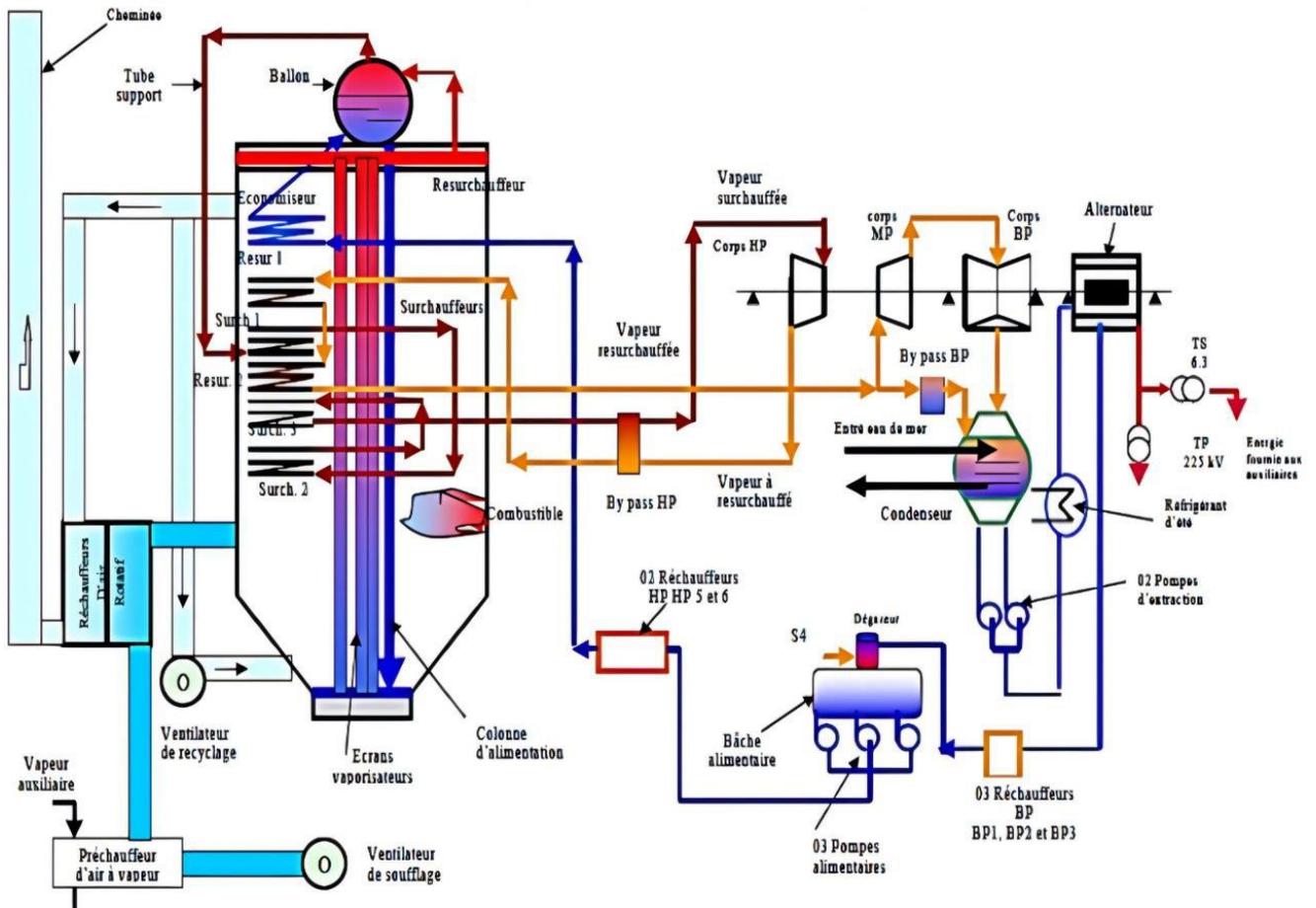


Figure I.2 : Schéma d'une tranche thermique[2]

I.3.3.1 Générateur de vapeur (chaudière)

Le générateur de vapeur est un dispositif qui convertit l'eau en vapeur à haute pression (HP) afin d'alimenter le groupe turbine-alternateur.

La chaudière livrée pour RAS-DJINET est de type à circulation naturelle. Les générateurs de vapeur sont de type à circulation naturelle (Circulation naturelle de l'eau et de la vapeur, l'eau qui arrive par gravité vers les tubes écrans, sera vaporisée sous l'effet de la combustion, et la vapeur produite, sera acheminée vers la partie supérieure du ballon chaudière par différence de densité avec l'eau).

Le tableau 01 ci-dessous représente les Caractéristique de la chaudière :

Tableau I.1 : Caractéristique de la chaudière

Température de vapeur surchauffée	540 C°
Température de la vapeur resurchauffée	535 C°
Température dans le foyer	900 C°
Température de l'eau d'alimentation	245 C°
Capacité de vaporisation	540 T/H
Pression à la sortie des surchauffeurs	147 bar

La **figure I.3** ci-dessous montre la chaudière de la centrale de Cap Djinet :



Figure I.3 : Chaudière de la centrale de Cap Djinet.

La chaudière se compose principalement des éléments suivants :

- a. L'économiseur** : c'est une tuyauterie en forme de serpent, il a pour fonction, la réception, le réchauffement et le guidage de l'eau d'alimentation vers le ballon chaudière.
- b. Le ballon chaudière** : Le ballon chaudière agit comme un réservoir pour recevoir l'eau d'alimentation et la vapeur provenant des tubes écrans. Il est rempli à parts égales de vapeur et d'eau. Le niveau d'eau dans le ballon chaudière reste stable tout au long du fonctionnement de la chaudière.

- c. **Les colonnes de descente et des tubes écrans** : Les tubes écrans, qui forment les parois de la chambre de combustion, sont approvisionnés en chaleur à leur base par quatre colonnes descendantes. Cette chaleur, principalement reçue par rayonnement, est ensuite transférée à l'eau en vue de sa vaporisation.
- d. **Les surchauffeurs** : Trois surchauffeurs (primaire, secondaire et tertiaire) élèvent la température de la vapeur au-delà du point de saturation à **540 C°** en récupérant la chaleur des fumées du foyer. Cela élimine l'humidité de la vapeur, améliorant le rendement de la turbine et réduisant la consommation de combustible.
- e. **Les désurchauffeurs** : Cette fonction règle la température de la vapeur à la sortie du dernier surchauffeur.
- f. **Les brûleurs** : Le générateur de vapeur est équipé de huit brûleurs, pouvant fonctionner au gaz naturel ou au fioul léger, répartis sur quatre niveaux de la façade avant de la chaudière.
- g. **Chambre de combustion** : La source de chaleur du générateur de vapeur est constituée de tubes écrans qui captent la chaleur émise par les flammes des brûleurs.
- h. **Ventilateurs de soufflage** : Les ventilateurs de soufflage ont pour fonction de fournir à la chaudière la quantité nécessaire d'air pour la combustion. Ils aspirent l'air extérieur et le dirigent vers les brûleurs à travers le préchauffeur à vapeur et le réchauffeur rotatif. Chaque tranche est équipée de deux de ces ventilateurs.
- i. **Ventilateurs de recyclage** : Chaque tranche est pourvue de deux ventilateurs de recirculation des fumées, aspirant une portion des gaz de combustion à la sortie de la chaudière et les réintroduisant dans la partie inférieure de la chambre de combustion, avant le réchauffeur d'air. Cette stratégie augmente l'efficacité, surtout à faible charge.

I.3.3.2 La Turbine

La turbine est le composant central de la tranche, jouant un rôle crucial dans la conversion de l'énergie thermique en énergie mécanique pour alimenter l'alternateur. Elle se compose de trois corps distincts : haute pression (HP), moyenne pression (MP) et basse pression (BP). Chacun de ces corps comporte six soutirages qui alimentent trois réchauffeurs BP, deux réchauffeurs HP et la bêche alimentaire. Le rotor de la turbine est intimement lié à l'alternateur, formant un ensemble qui tourne à une vitesse constante réglée à 3000 *tr/min*. Les caractéristiques principales de la turbine sont présentées par le tableau suivant :

Tableau I.2 : Caractéristique de la Turbine

Longueur	16,125 m
Largeur	13 m
Poids	500000KG
Puissance	176 MW
Température vapeur	537 °C
Vitesse de rotation	3000 T/MIN



Figure I.4 : Images des trois corps de la turbine à vapeur [2]

I.3.3.3 L'alternateur

L'alternateur est un appareil crucial dans la production d'électricité. Sa fonction principale est de convertir l'énergie mécanique provenant de l'arbre de la turbine en énergie électrique. Il s'agit d'un alternateur à pôles lisses produisant un courant alternatif triphasé. Cette transformation génère une quantité importante de chaleur, nécessitant un système de refroidissement efficace. Pour ce faire, un circuit fermé à hydrogène est utilisé, refroidi à son

tour par de l'eau déminéralisée. Les caractéristiques principales de l'alternateur sont présentées par le tableau suivant :

Tableau I.3 : Caractéristique de l'alternateur

Tension nominale	15,5 KV
Puissance nominale	220 MVA
Puissance active	176 MW
Excitation	À diodes tournantes
Poids du stator complet	198 tonnes
Poids du rotor seul	36,7 tonnes



Figure I.5 : L'alternateur de la centrale [2]

I.3.3.4 Le transformateur

Un transformateur électrique est un dispositif essentiel permettant de modifier les valeurs de tension fournies par une source d'énergie électrique alternative, afin de les adapter à un système de tension différent, tout en conservant la même fréquence et la même forme d'onde.

Étant donné que la tension à la sortie de l'alternateur est basse et le courant électrique très élevé, il est impératif de réduire les pertes par effet Joule en utilisant un transformateur de tension. Dans ce contexte, un transformateur de 15,5 kV à 220 kV, avec une puissance de 220 MW à travers un disjoncteur coupleur, est employé. Le transformateur est refroidi par une circulation forcée d'huile dans un circuit fermé, avec refroidissement supplémentaire par air.



Figure I.6 : Transformateur.

I.3.3.5 Le poste d'eau :

Le poste d'eau est l'ensemble des équipements qui préchauffe l'eau et le transfert du condenseur jusqu'à la chaudière en passant par la bache alimentaire (dégazeur).

Le poste d'eau est constitué de :

- a. **Condenseur** : celui-ci assure la condensation de la vapeur évacuée du corps BP de la turbine par la circulation de l'eau de mer de refroidissement (débit de $2 \times 12000 \text{ m}^3/h$).
- b. **Deux (02) pompes d'extraction** : celles-ci assurent le transfert de l'eau depuis du condenseur jusqu'à la bache alimentaire en passant par les trois (03) réchauffeurs BP (le débit nominal d'une pompe d'extraction est $414 \text{ m}^3/h$).
- c. **Trois (03) Pompes alimentaires** : Dans chaque groupe, il y a trois pompes alimentaires : deux pour le fonctionnement normal et une en réserve, servant à alimenter la chaudière à partir de la bache alimentaire. (le débit nominal des pompes est $3 \times 261,6 \text{ m}^3/h$).

La pompe alimentaire est composée d'une pompe nourricière, d'un moteur asynchrone triphasé, d'un variateur de vitesse hydraulique (aussi appelé coupleur hydraulique) et d'une pompe principale.

- f. **Bâche alimentaire** : La bache alimentaire est un réservoir cylindrique où l'eau dégazée des réchauffeurs basse pression est chauffée par le soutirage du corps moyenne pression de la turbine, atteignant ainsi sa température de saturation. Elle agit également comme un échangeur thermique en condensant la vapeur de la turbine. Le niveau d'eau et de vapeur reste constant pendant le fonctionnement du groupe.

I.3.3.6 Les différents auxiliaires :

Les différents auxiliaires correspondent principalement à deux stations, l'une pour la production d'hydrogène et l'autre au pompage de l'eau de mer. Et deux postes, un pour la détente du gaz et l'autre pour le stockage du fuel. Le rôle de chacune de ces composantes est donné comme suit :

- a. Une station de production d'hydrogène :** Sert à produire l'hydrogène nécessaire au refroidissement des 4 alternateurs de la centrale.
- b. Un poste de détente gaz :** Composé de deux (02) lignes de filtration gaz, et trois (03) lignes de régulation pour la détente gaz de 60 à 6 bars.
- c. Un poste de stockage du fuel :** Ce sont deux (02) réservoirs d'une capacité de 10000m³ chacun. Utilisée en cas d'absence de gaz ou en cas d'incidents sur la conduite d'alimentation de gaz.
- d. Une station de pompage de l'eau de mer :** Trois conduites de trois mètres de diamètre, situées à six mètres sous la surface terrestre et s'étendant sur 900 mètres dans la mer, permettent le transfert automatique de l'eau vers le bassin par différence de niveau. Avant d'être aspirée, l'eau est filtrée à deux reprises : d'abord par des grilles pour éliminer les gros débris, puis par des tambours filtrants pour éliminer les particules plus fines. Ce processus assure un approvisionnement en eau propre.

I.3.3.7 La station de traitement de l'eau de mer :

La station de traitement de l'eau de mer comprend trois stations qui sont :

- a. Une station d'électro-chloration :** La chloration de l'eau de mer permet de protéger le circuit d'eau de mer (condenseur, conduite d'amenée d'eau de mer) contre tout encrassement pouvant être causé par les micro-organismes marins. Elle se fait par injection d'hypochlorite de sodium.
- b. Une station de dessalement :** La station de dessalement assure une production efficace d'eau dessalée à partir de l'eau de mer grâce à ses quatre unités de dessalement, chacune produisant 500m³ par jour. Cette eau est stockée dans deux grandes bâches de 2700 m³ chacune, assurant un approvisionnement constant en eau pour divers besoins. Cette organisation garantit une fiabilité et une disponibilité continues de l'eau dessalée, répondant ainsi efficacement et durablement aux besoins de la communauté.

- c. **Une station de déminéralisation** : Pour compléter le traitement de l'eau avant son utilisation, deux chaînes de déminéralisation, comprenant des filtres à lit mélangé, fonctionnent à une capacité de $40 \text{ m}^3/\text{h}$ chacune. Ces filtres jouent un rôle crucial dans l'élimination des minéraux et des impuretés de l'eau, assurant ainsi sa qualité. Une fois déminéralisée, l'eau est stockée dans deux réservoirs, chacun d'une capacité de 1500 m^3 . Cette étape de stockage garantit un approvisionnement fiable en eau déminéralisée, essentielle pour divers processus industriels et autres applications sensibles.

I.3.3.8 Système de surveillance d'alarme et d'analyse

Les paramètres d'exploitation des équipements du groupe de production sont constamment surveillés et enregistrés en salle de commande pour assurer un fonctionnement optimal. Des seuils sont établis pour déclencher des alertes en cas de dépassement. De plus, un consignateur d'état est utilisé pour enregistrer chronologiquement les alarmes en cas d'incident, facilitant ainsi l'analyse des causes sous-jacentes. Ces mesures garantissent un fonctionnement sécurisé et efficace du groupe de production, minimisant les risques d'arrêts imprévus et maximisant la productivité globale.

a. Salle de commande centralisée

Chaque paire de tranches est surveillée et contrôlée depuis une salle de commande dédiée, équipée de deux pupitres de conduite et de deux tableaux verticaux regroupant les organes de commande et les appareils d'enregistrement des paramètres. Un tableau synoptique schématise les auxiliaires électriques pour une représentation visuelle claire. Cette configuration permet un contrôle précis et une gestion efficace, assurant ainsi la fiabilité et la performance du système.



Figure I.7 : Salle de commande.

I.3.4 Principe de fonctionnement de la centrale thermique

Dans une centrale thermique à vapeur, la production de l'énergie électrique comporte trois transformations énergétiques données comme suit :

1ère étape : La transformation de l'énergie chimique du combustible en énergie thermique vapeur dans la chaudière.

2ème étape : La transformation de l'énergie thermique en énergie mécanique par la turbine.

3ème étape : La transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique par l'alternateur.

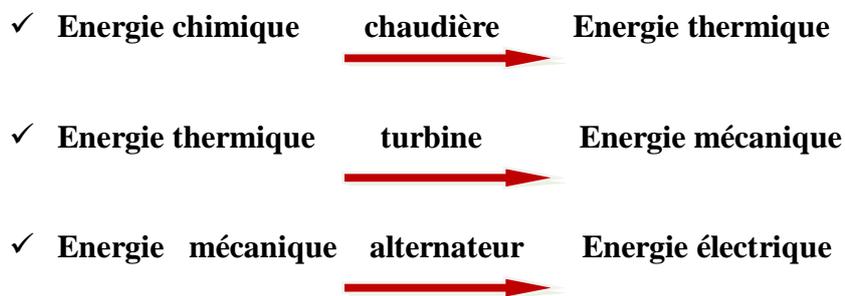


Figure I.8 : Principe de fonctionnement de la centrale thermique

Le processus de traitement du condensât et d'alimentation en eau est vital pour le fonctionnement optimal de la centrale électrique. Le condensât est extrait et dirigé vers la bache alimentaire à travers diverses étapes, tandis que l'eau est chauffée et vaporisée avant d'être acheminée vers la turbine pour produire de la vapeur. Cette vapeur, à haute pression et température, est ensuite utilisée pour alimenter les turbines et générer de l'électricité. Ce processus sophistiqué assure un approvisionnement continu en énergie tout en maintenant les conditions de fonctionnement adéquates.

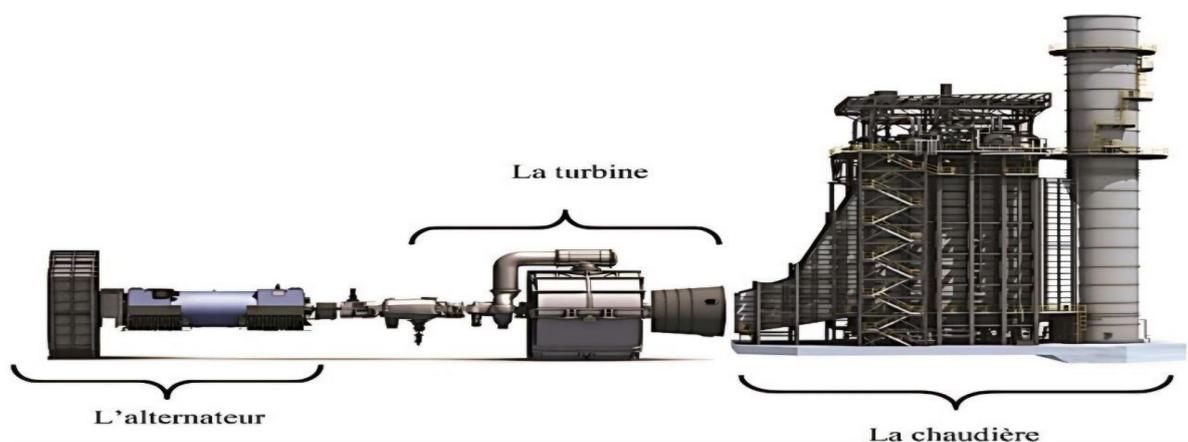


Figure I.9 : les trois phases de la production de l'énergie [2]

I.4 Conclusion

Ce présent chapitre est conçu pour offrir une vue d'ensemble de la centrale thermique de Cap-Djinet, mettant en lumière son fonctionnement fondamental ainsi que ses équipements auxiliaires. La centrale thermique de Cap-Djinet constitue un élément crucial de l'infrastructure énergétique, exploitant diverses sources de combustibles fossiles comme le gaz naturel ou le fioul pour produire de l'électricité. Son principe de fonctionnement repose sur la transformation de la chaleur générée par la combustion en énergie thermique puis mécanique, puis en électricité, grâce à des turbines et des alternateurs. Les auxiliaires de la centrale, tels que les systèmes de refroidissement, de surveillance et de contrôle, ainsi que les équipements de traitement des émissions, contribuent au bon fonctionnement et à la sécurité de l'installation.

Dans le chapitre suivant, nous approfondirons notre étude en nous concentrant sur le Moteur Asynchrone triphasé et son variateur.

CHAPITRE II

***Etude générale de la pompe
alimentaire et du variateur de vitesse***

Chapitre II

Etude générale de la pompe alimentaire et du variateur de vitesse

II.1 Introduction

Ce deuxième chapitre abordera une brève présentation de la pompe alimentaire ; son rôle dans la station thermique, son emplacement et ces différents composants, dont fait partie le variateur de vitesse hydraulique. Une étude générale sur ce variateur hydraulique sera entreprise et ceci dans le but de remédier au problème actuel rencontré par l'installation thermique de Cap-Djinet. Un nouvel variateur de vitesse sera proposé pour remplacer l'actuel dispositif, ce dernier sera basé sur un fonctionnement purement électrique.

II.2 La pompe alimentaire

II.2.1 Le rôle de la pompe alimentaire

Le rôle principal de la pompe alimentaire est de faire circuler l'eau de la bêche alimentaire vers le ballon de la chaudière.

La pompe alimentaire doit fournir la quantité d'eau nécessaire pour maintenir le niveau de l'eau dans le réservoir de la chaudière.

II.2.2 Emplacement de la pompe alimentaire

La pompe alimentaire est située au niveau le plus bas de la centrale thermique, celle-ci est placée entre la bêche alimentaire et le ballon chaudière.

Chaque groupe se compose de trois pompes alimentaires, dont deux(02) sont en fonctionnement normal et un(01) est en réserve.

II.2.3 Les composants d'une pompe alimentaire

Le groupe moto pompe d'eau d'alimentation de la centrale thermique est composé des principaux composants suivants :

- Pompe nourricière.
- Un moteur asynchrone triphasé.
- Pompe principale.
- Un variateur de vitesse hydraulique (coupleur hydraulique).



Figure II.1 : Les composants d'une pompe alimentaire.

II.2.3.1 Pompe nourricière

C'est une pompe centrifuge et elle est composée d'un étage et a pour fonction d'augmenter la pression de l'eau en aspirant de l'eau de la bache alimentaire, puis de la renvoyer dans la pompe principale.



Figure II.2 : Pompe nourricière.

II.2.3.2 Un moteur asynchrone triphasé

Le moteur asynchrone triphasé transforme l'énergie électrique en énergie mécanique, responsable de l'entraînement des pompes principale et nourricière. Il est extrêmement robuste

et largement utilisé dans l'industrie en raison de sa constitution, de sa fiabilité, de son faible coût, de sa simplicité de construction et de sa réversibilité en fonctionnement.

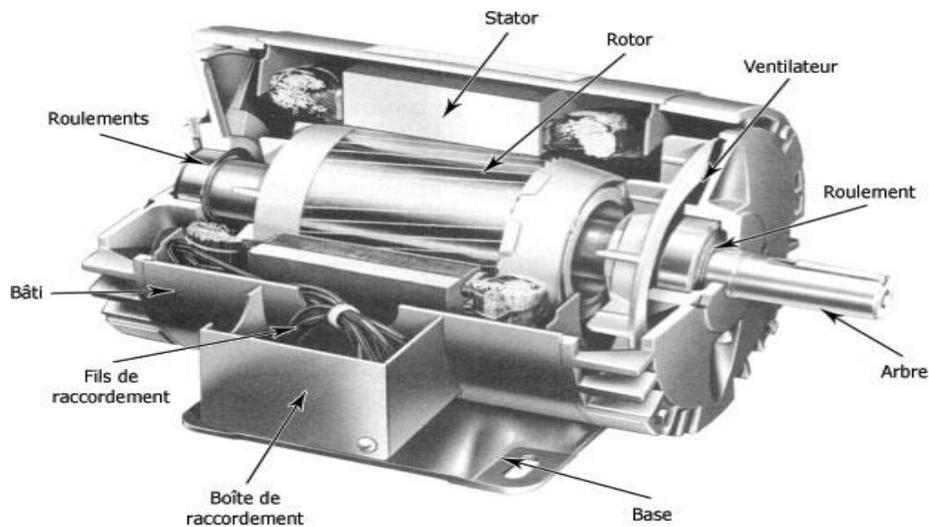


Figure II.3 : Moteur asynchrone triphasé [2]

Le tableau suivant montre les caractéristiques techniques du moteur utilisé dans la station :

Tableau II.1 : Caractéristiques techniques de moteur

Puissance nominale	3000kw
Fréquence nominale	50Hz
Couplage	Etoile
Vitesse nominale	1493 t/m
Température ambiante	45 C°

II.2.3.2.1 Constitution du moteur asynchrone

Le moteur asynchrone triphasé se compose principalement d'un stator qui est la partie fixe du moteur et d'un rotor qui est la partie mobile du moteur, que nous décrivons comme suit :

- a. **Le stator :** C'est la partie fixe du moteur, il est formé d'une carcasse ferromagnétique qui contient trois enroulements électriques alimentés chacune par une phase de tension U , et d'une fréquence f . Le passage de courant dans les enroulements crée un champ magnétique tournant \vec{B} à l'intérieur du stator.

- b. Le rotor :** C'est la partie mobile du moteur asynchrone, il tourne moins vite que le champ tournant du stator, il porte soit un bobinage accessible par trois bagues et trois balais, soit une cage d'écurie non accessible à base des barres conductrices en aluminium.

II.2.3.2 Principe de fonctionnement du moteur asynchrone triphasé

Le champ magnétique tournant (\vec{B}) créé par les bobinages statoriques balaie le bobinage rotorique et y induit des forces électromotrices (f.é.m.) d'après la loi de Lenz. Le bobinage rotorique étant en court-circuit, ces (f.é.m.)y produisent des courants induits. L'action de ce champ sur les courants induits crée le couple moteur. Ce dernier tend à réduire la cause qui a donné naissance aux courants, c'est à dire la rotation relative du champ tournant par rapport au rotor. Le rotor va donc avoir tendance à suivre ce champ.

II.2.3.3 Pompe principale

La pompe décrite est une centrifuge multicellulaire à six étages, conçue avec une aspiration et un refoulement radial pour assurer un fonctionnement efficace. Son mécanisme est alimenté par un moteur électrique puissant, d'une capacité de 3 MW, fonctionnant à une vitesse de rotation de 5200 tr/min. Cette configuration offre une performance fiable et adaptée aux besoins spécifiques de l'application envisagée.



Figure II.4 : Pompe principale.

II.2.3.4 Un variateur de vitesse hydraulique

Le variateur de vitesse hydraulique offre la possibilité d'ajuster la vitesse de la pompe alimentaire.

Le variateur de vitesse hydraulique ajuste la vitesse de rotation d'un système en contrôlant le débit d'huile dans un circuit hydraulique. En régulant la quantité d'huile qui passe à travers un dispositif, il peut modifier la vitesse de sortie, offrant ainsi un réglage continu et précis de la vitesse du système entraîné.

Le moteur à vitesse constante, qui peut également être la turbine principale, entraîne l'intermédiaire de l'arbre primaire du variateur de vitesse. Ensuite, l'arbre secondaire du variateur de vitesse entraîne la pompe principale.

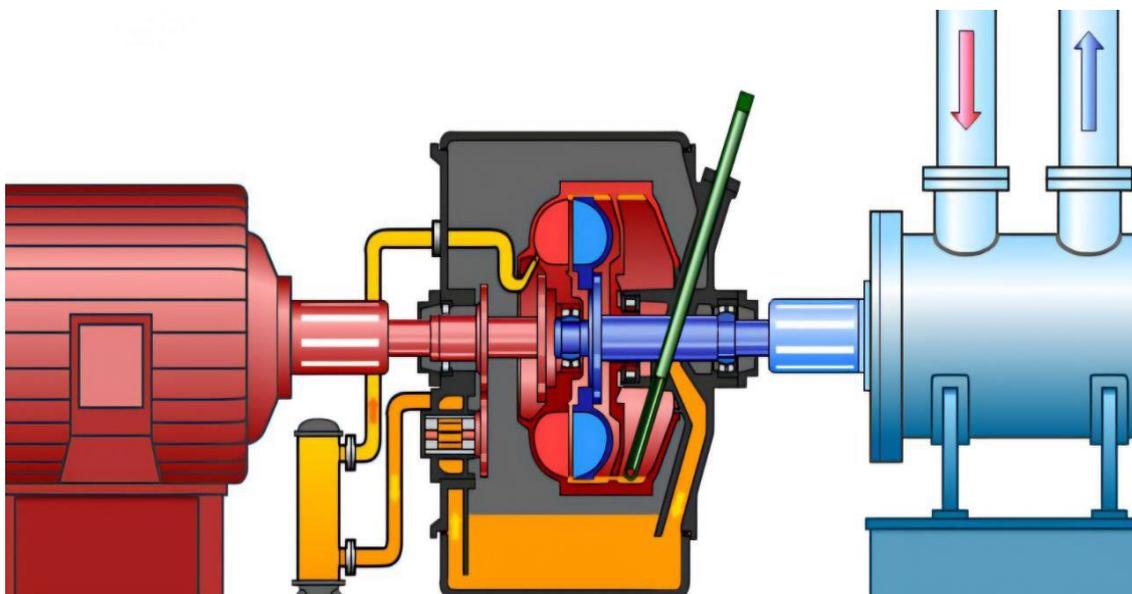


Figure II.5 : Schéma du variateur de vitesse hydraulique [1]

Les désavantages des variateurs de vitesse hydrauliques incluent une installation et une maintenance plus complexes, des coûts initiaux plus élevés par rapport à d'autres types de variateurs de vitesse, des risques de fuites hydrauliques et des problèmes mécaniques tels que des problèmes de coussinets et de paliers. De plus, leur efficacité énergétique est généralement moins élevée que celle de certains systèmes électriques. En outre, ces dispositifs hydrauliques peuvent nécessiter un espace supplémentaire, ce qui peut limiter leur utilisation dans certains contextes.

II.3 Étude de nouvel variateur de vitesse

L'utilisation croissante des variateurs de vitesse dans le milieu industriel est préférable dans le but de protéger les installations existantes contre les perturbations électriques. Pour cela, il est utile d'étudier le variateur, ses constitutions et son choix pour qu'on puisse commander convenablement le moteur.

II.3.1 Principe de base du variateur de vitesse

Le variateur de vitesse permet de contrôler la vitesse du moteur et la vitesse nominale en changeant la fréquence de la tension d'alimentation en allant de ($f = 0 \text{ Hz}$) à la vitesse nominale du moteur ($f = 50 \text{ Hz}$). Il est composé :

- **d'un redresseur** : qui est connecté à une alimentation triphasée qui génère une tension continue à ondulation résiduelle (le signal n'est pas parfaitement continu). Le redresseur peut être de type commandé ou pas.
- **d'un circuit intermédiaire** : agissant principalement sur le "lissage" de la tension de sortie du redresseur (améliore la composante continue). Il peut aussi servir de dissipateur d'énergie lorsque le moteur devient générateur, il est composé d'une Bobine de lissage "passe bas" (filtrage de basses fréquences), et d'un condensateur "passe haut" (filtrage des hautes fréquences) permettant de réduire l'ondulation résiduelle.
- **d'un onduleur** : qui engendre le signal de puissance à tension et/ou fréquence variables.

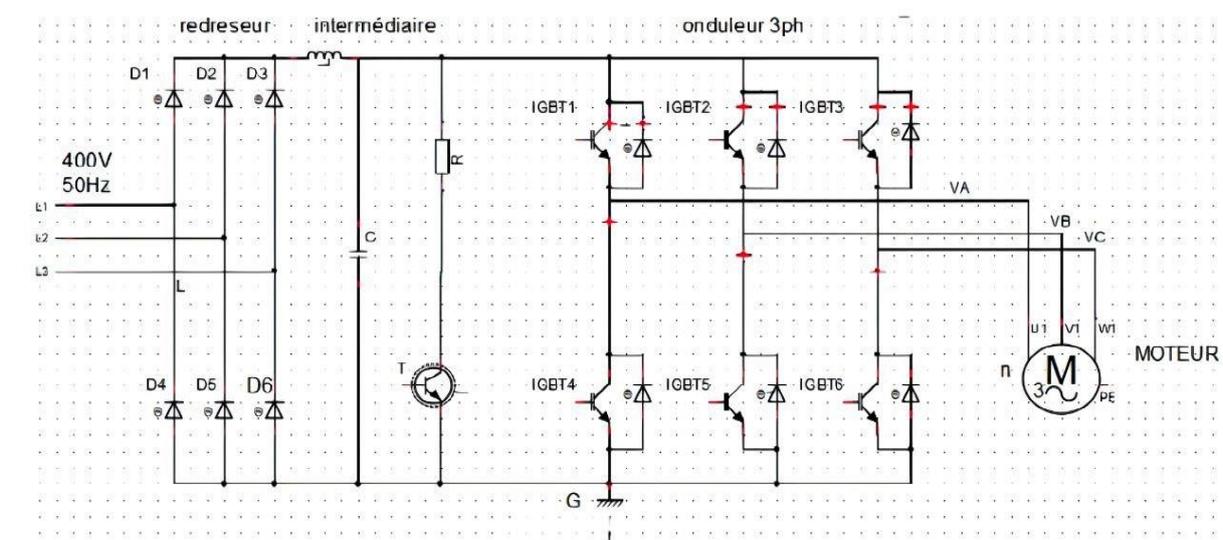


Figure II.6 : Schéma du variateur de vitesse [12]

II.3.1.1 Le redresseur

C'est un convertisseur destiné à alimenter une charge qui nécessite une tension ou un courant continu à partir d'une source alternative. L'alimentation est dans la plupart du temps, un générateur de tension. Cette opération se réalise par l'utilisation :

- Soit d'un pont de diodes, le redresseur est « non-commandé ».
- Soit d'un pont de thyristors, alors le redresseur est « commandé ».

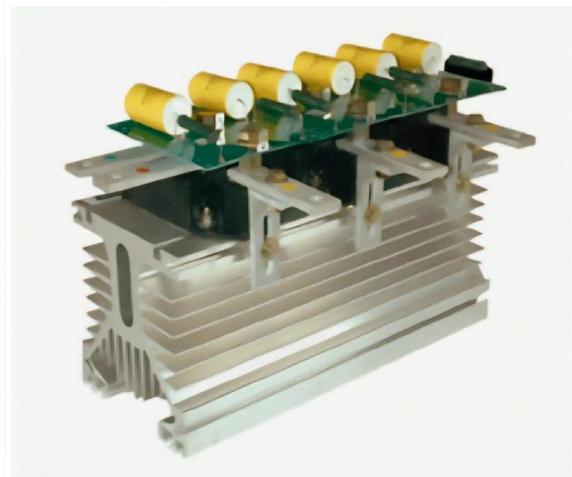
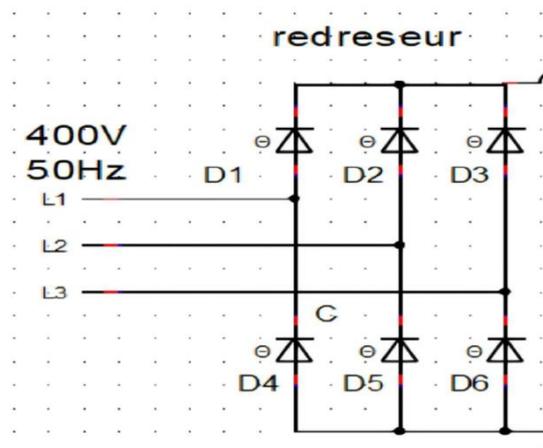


Figure II.7 : Schéma du redresseur à base de diodes [12]

II.3.1.2 Le circuit intermédiaire

Il peut aussi servir à :

- 1) Découpler le redresseur de l'onduleur.
- 2) Réduire les harmoniques.
- 3) Stocker l'énergie.
- 4) Permettant de réduire l'ondulation résiduelle.

La bobine et le condensateur travaillent ensemble pour fournir à la charge la tension la plus linéaire possible.

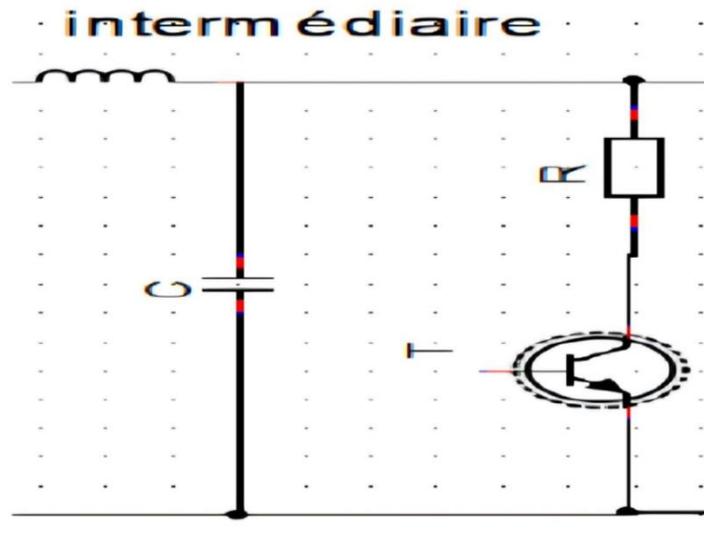


Figure II.8 : Schéma intermédiaire [12]

II.3.1.3 L'onduleur

L'onduleur constitue la dernière partie du variateur de vitesse. Il s'agit d'un convertisseur statique continu-alternatif (DC/AC), permettant de fabriquer une source de trois tensions alternatives à partir d'une source de tension continue.

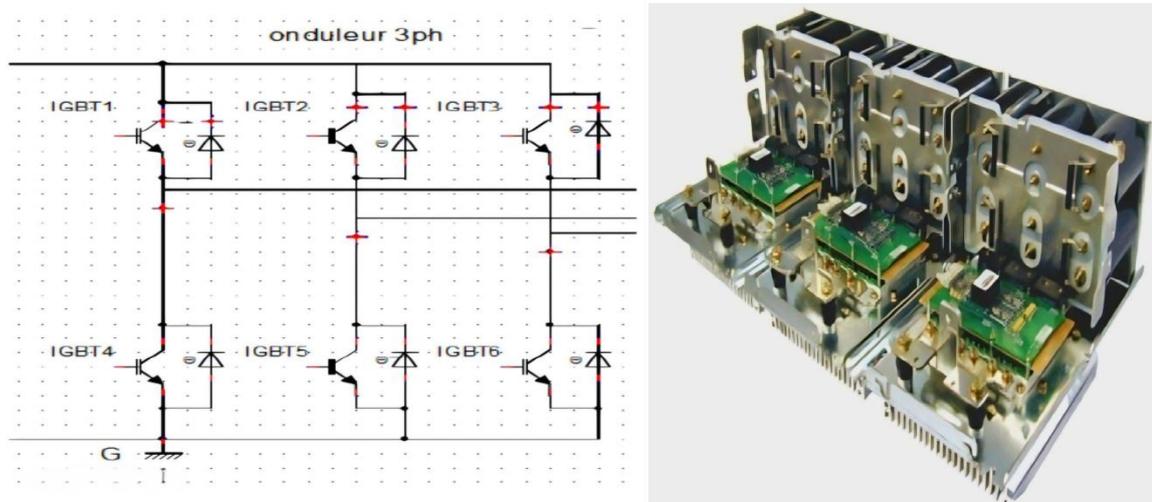


Figure II.9 : Schéma de l'onduleur triphasé [12]

Il est constitué d'une source de tension continue et de six interrupteurs IGBT monté en pont. La tension continue est généralement obtenue par le redresseur triphasé à diodes suivi d'un filtrage par le circuit intermédiaire

L'onduleur est très utilisé en commande à **MLI** (Modulation de Largeur d'Impulsion), connue aussi en anglais par l'appellation **PWM** (Pulse Width Modulation), pour

l'alimentation des récepteurs triphasés équilibrés à tension et fréquence variables. Elle consiste à changer la largeur des impulsions de tension de sortie avec des commandes appropriées des interrupteurs à semi-conducteurs. Les trois tensions de sortie est formé d'une onde bistable prenant les valeurs $-E$ et $+E$ et décalées de $(2\pi/3)$ l'une par rapport à l'autre.

La figure suivante explique la manière de fonctionnement d'un onduleur triphasé :

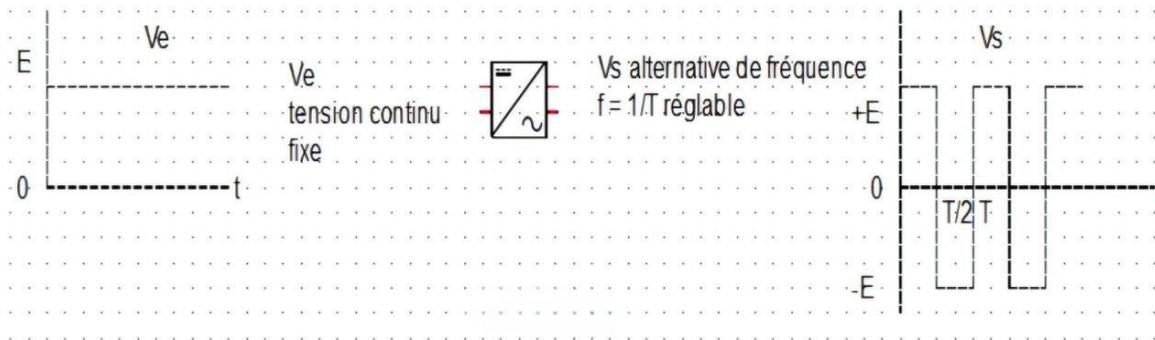


Figure II .10 : Principe de fonctionnement de l'onduleur triphasé [12]

II.3.2 Les fonctions du variateur de vitesse

Les fonctions principales du variateur de vitesse peuvent être résumées en ces points suivants :

- 1) **Démarrage** : Le moteur passe de la vitesse nulle jusqu'à sa vitesse établie en un temps prédéfini et en évitant les points d'intensité.
- 2) **La variation de vitesse** : modification de la fréquence de rotation du moteur par accélération ou décélération en un temps donné.
- 3) **La régulation** : la fréquence de rotation du moteur est maintenue constante quelles que soient les fluctuations de la charge (dans certaines limites).
- 4) **Le freinage** : le moteur passe d'une vitesse établie à une vitesse inférieure (ralentissement) ou à la vitesse nulle (arrêt) avec maintien en position possible.
- 5) **L'inversion du sens de marche** (c'est à dire sens de rotation) : permet de faire fonctionner la machine asynchrone dans les deux sens de rotation.
- 6) **La récupération d'énergie** : permet lors d'un ralentissement ou d'un freinage des systèmes de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique.

II.3.3 Avantages et inconvénients du variateur de vitesse

II.3.3.1 Les avantages du variateur de vitesse

Les avantages du variateur de vitesse consistent essentiellement en :

- Démarrage progressif de moteur réduisant les chutes de tension dans le réseau et limitant les courants de démarrage.
- Précision accrue de la régulation de vitesse.
- Economie d'énergie : diminution de la consommation d'électricité.

II.3.3.2 Inconvénients du variateur de vitesse

Les principaux inconvénients du variateur de vitesse résident dans :

- Perturbation de réseau (les harmoniques) : les IGBT forment une charge non linéaire qui engendre des courants harmoniques, sources de distorsion de l'onde (chute ou perturbation de la tension) dans le réseau électrique.
- Câblage plus complexe.
- Le cout élevé.

II.4 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a couvert la présentation de la pompe alimentaire et ses composants, dont le variateur de vitesse hydraulique qui ne correspond plus aux exigences de la station de Cap-Djinet. Ainsi, un nouveau variateur de vitesse est proposé pour remplacer l'actuel variateur, dont le fonctionnement est purement électrique. Nous avons notamment abordé ses principes de fonctionnement, ses avantages et ses inconvénients. Le prochain chapitre se penchera sur la simulation du variateur de vitesse, permettant ainsi une application concrète des notions étudiées.

CHAPITRE III

***Contrôle du variateur de vitesse la
machine asynchrone triphasé***

Chapitre III

Contrôle du variateur de vitesse la machine asynchrone triphasé

III.1 Introduction

Ce chapitre vise à réaliser les simulations pour les étapes de conception du variateur de vitesse qui alimente le moteur asynchrone triphasé. Nous allons pour cela investiguer deux méthodes de contrôle : la première méthode est ce qu'on appelle la '*la pleine onde à 180 degrés*' et la deuxième méthode est la *MLI* qui est la '*Modulation de Largeur d'Impulsion*' qu'on retrouve souvent par son appellation en anglais *PWM (Pulse Width Modulation)*

III.2 Présentation du logiciel « PSIM »

PSIM est une plateforme de simulation dédiée à l'électrotechnique et à l'électronique de puissance. Le logiciel offre la possibilité de créer des schémas de montage en utilisant une variété d'éléments issus de sa bibliothèque, tels que des machines, des transformateurs, des interrupteurs électroniques, ainsi que des dispositifs de commande et de contrôle. Les instruments de mesure placés sur ces schémas permettent de générer des courbes représentant les grandeurs électriques et mécaniques simulées.

III.3 Simulation du système : variateur de vitesse avec moteur

Pour ajuster la vitesse du rotor d'une machine asynchrone, on agit sur la fréquence et la tension (ou le courant) appliquées au stator. Par conséquent, pour se donner les moyens de cette action, il faut disposer d'une source d'alimentation capable de délivrer une tension d'amplitude et de fréquence réglable en valeur instantanée.

La figure suivante présente la structure d'un variateur de vitesse mettant en œuvre une machine asynchrone alimentée par un onduleur de tension :

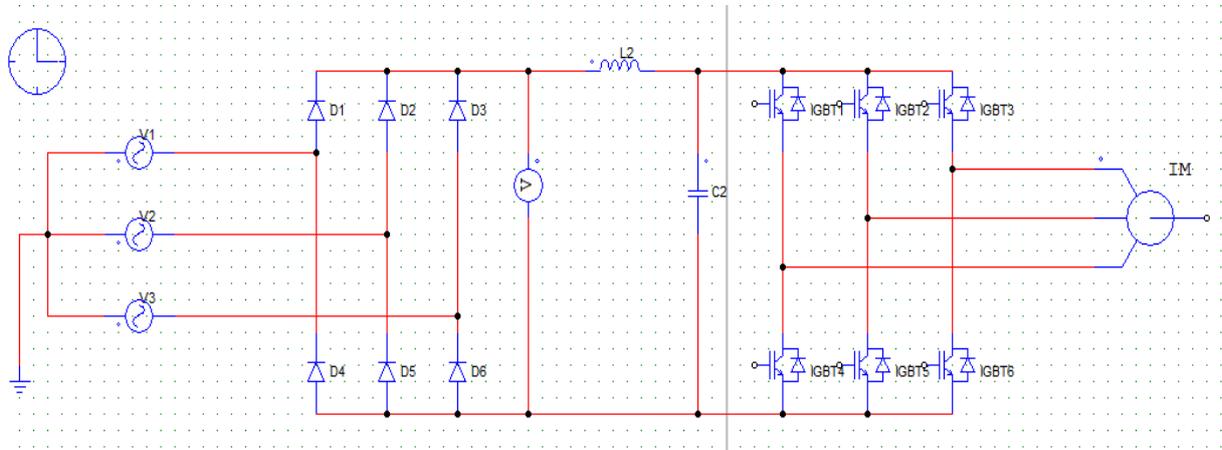


Figure III.1 : Schéma électrique du variateur de vitesse du moteur asynchrone triphasé sur PSIM.

Les ordres d'activations des six interrupteurs à semi-conducteurs (IGBT) de l'onduleur sont générés par un système de commande. Le système d'alimentation est composé :

- D'un redresseur à diodes ($D_1 - D_6$)
- D'un filtre LC
- D'un onduleur

III.3.1 Réseau d'alimentation du variateur de vitesse

Le système d'alimentation du variateur de vitesse est constitué d'une tension triphasée équilibrée. Cette tension a une amplitude de $230 \times \sqrt{2}$ et une fréquence de 50 Hz . Les valeurs de ces trois tensions (V_1, V_2, V_3) avec leur déphasage respectif est donné par la figure suivante :

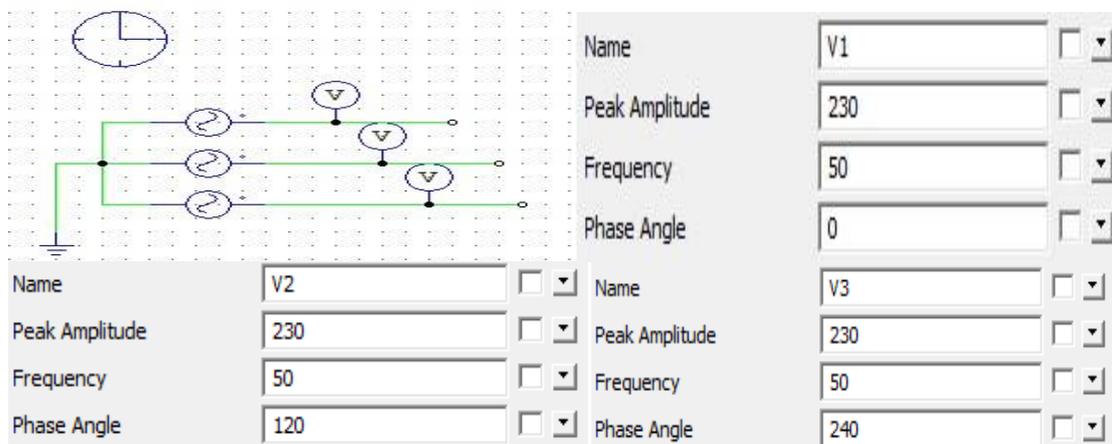


Figure III.2 : Réseau triphasé équilibré

Les tensions V_1, V_2 et V_3 s'écrivent comme suit

$$\begin{cases} V_1 = V_m \sin(\omega t) \\ V_2 = V_m \sin(\omega t - 4\pi/3) \dots \text{(III.1)} \\ V_3 = V_m \sin(\omega t - 2\pi/3) \end{cases}$$

Les courbes des signaux des tensions V_1, V_2 et V_3 visualisées sur PSIM sont présentées dans la figure ci-dessous :

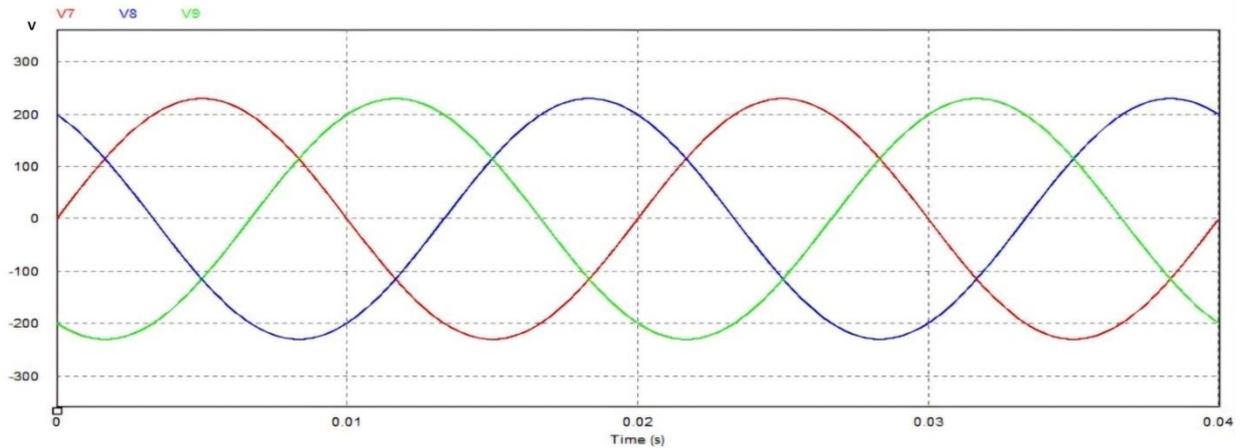


Figure III.3 : Les signaux des tensions V_1, V_2 et V_3

III.3.2 L'étage redresseur

Cet étage est constitué par 6 diodes, permet la conversion de la tension alternative en continue « AC/DC » comme il est présenté dans la figure suivante :

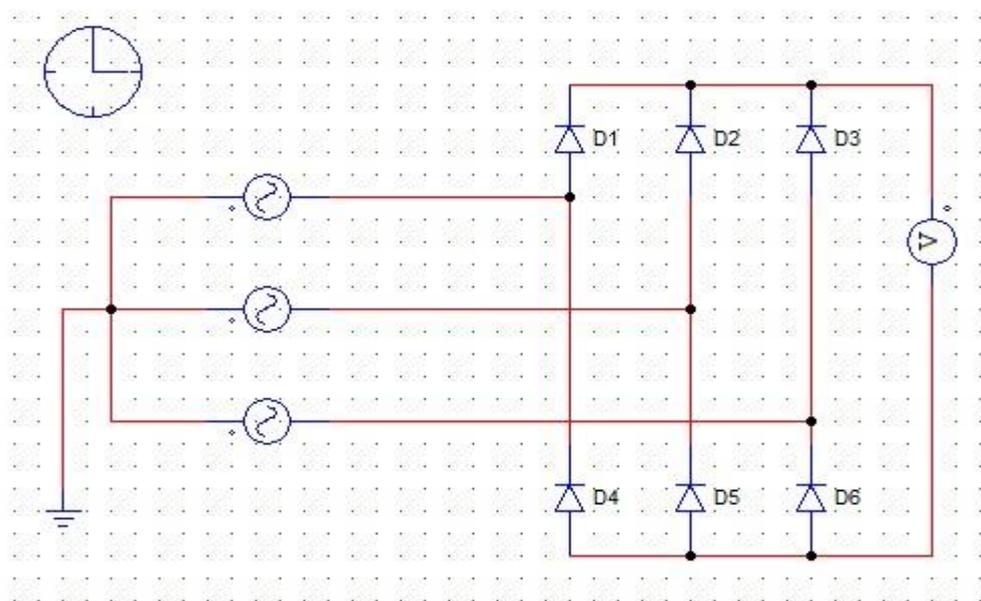


Figure III.4 : Etage redresseur.

La tension en sortie du redresseur est représentée dans la figure ci-dessous :

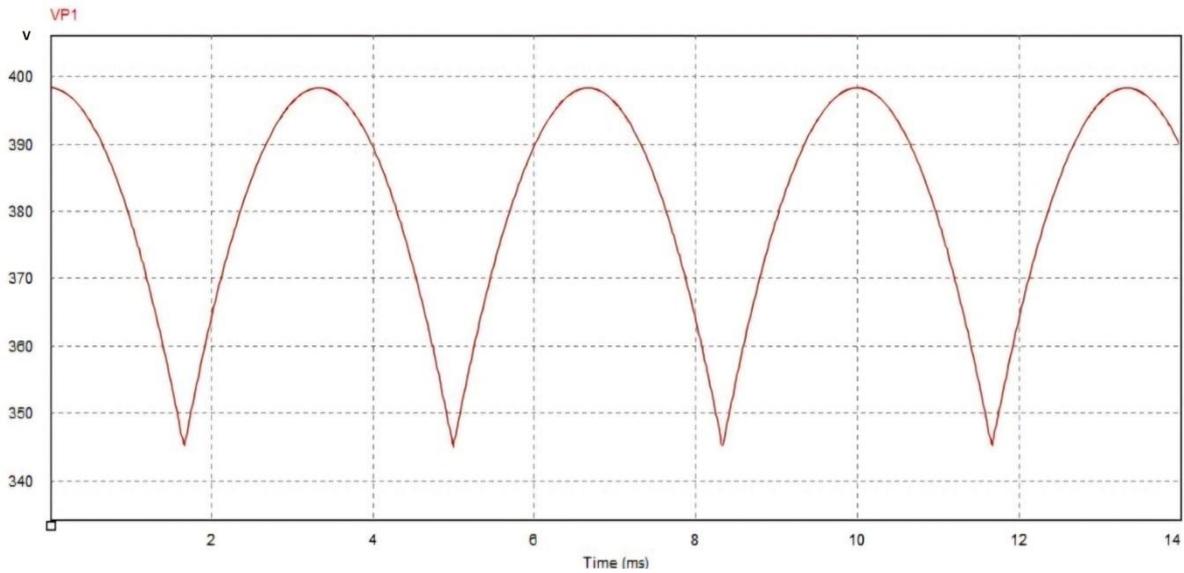


Figure III.5 : La tension redressée.

La tension redressée présente des fluctuations, ce qui rend nécessaire l'utilisation d'un dispositif de filtrage.

III.3.3 L'étage de filtrage

Après que la tension a été convertie de son état alternatif initial en une tension plus stable mais encore ondulée, nous utilisons un dispositif appelé filtre LC pour rendre celle-ci plus lisse et stable. Cela signifie que le filtre éliminera les perturbations indésirables et assure que la tension soit propre et régulière avant de la distribuer à d'autres parties du système.

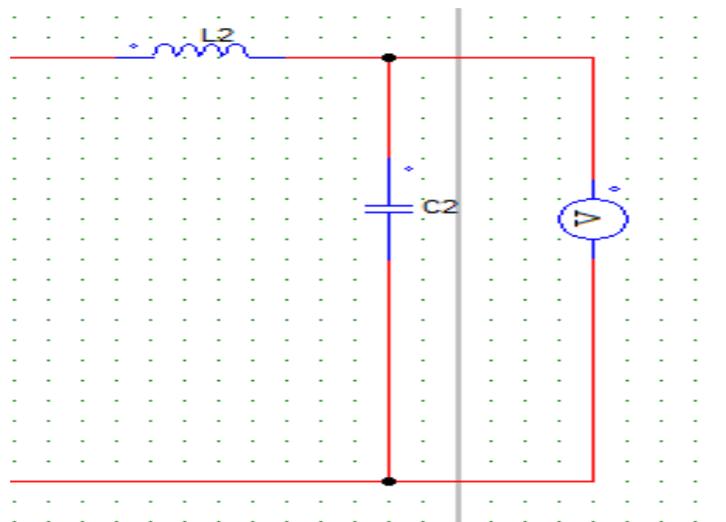


Figure III.6 : Filtre type LC.

La tension de sortie est représentée graphiquement par la figure ci-dessous :

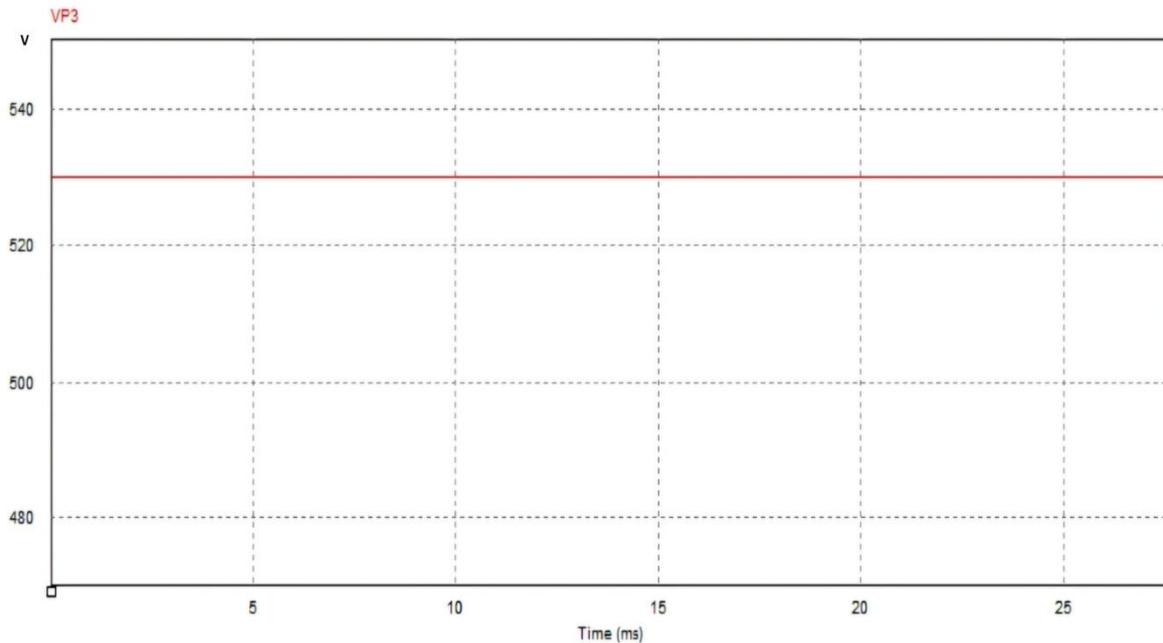


Figure III.7 : Simulation de la tension filtrée.

III.3.4 L'étage onduleur

L'onduleur aura le rôle de transformer la tension continue en une tension alternative triphasée pour alimenter la machine asynchrone triphasée. En effet, l'onduleur permet d'assurer une tension constante, quelle que soit la charge, en utilisant une méthode de commutation. Une commande spécifique lui permet de régler la fréquence et l'intensité de sortie. Deux principales techniques de commande seront utilisées : la pleine onde (180°) et la modulation de largeur d'impulsion (MLI).

III.3.4.1 Commande pleine onde (180°)

La commande pleine onde est une technique classique couramment utilisée pour contrôler les onduleurs. Dans cette section, nous allons décrire la méthode pleine ondes appliquée au système machine asynchrone. Les allures des tensions et courants seront aussi présentées.

a. Présentation du système d'étude contrôlé par la commande pleine onde

La Figure III.8 présente le schéma électrique de base du système étudié dans PSIM. Il s'agit d'un variateur de vitesse qui alimente un moteur. Ce schéma illustre également l'étage de

commande pleine onde de l'onduleur. Les interrupteurs de puissance de type IGBT sont activés de manière à ce que :

- À tout instant trois interrupteurs sont en état de conduction, et les autres sont bloqués.
- Deux interrupteurs dans un même bras doivent être contrôlés ensemble pour éviter un court-circuit de la source de tension. C'est là que l'étage d'interface intervient.

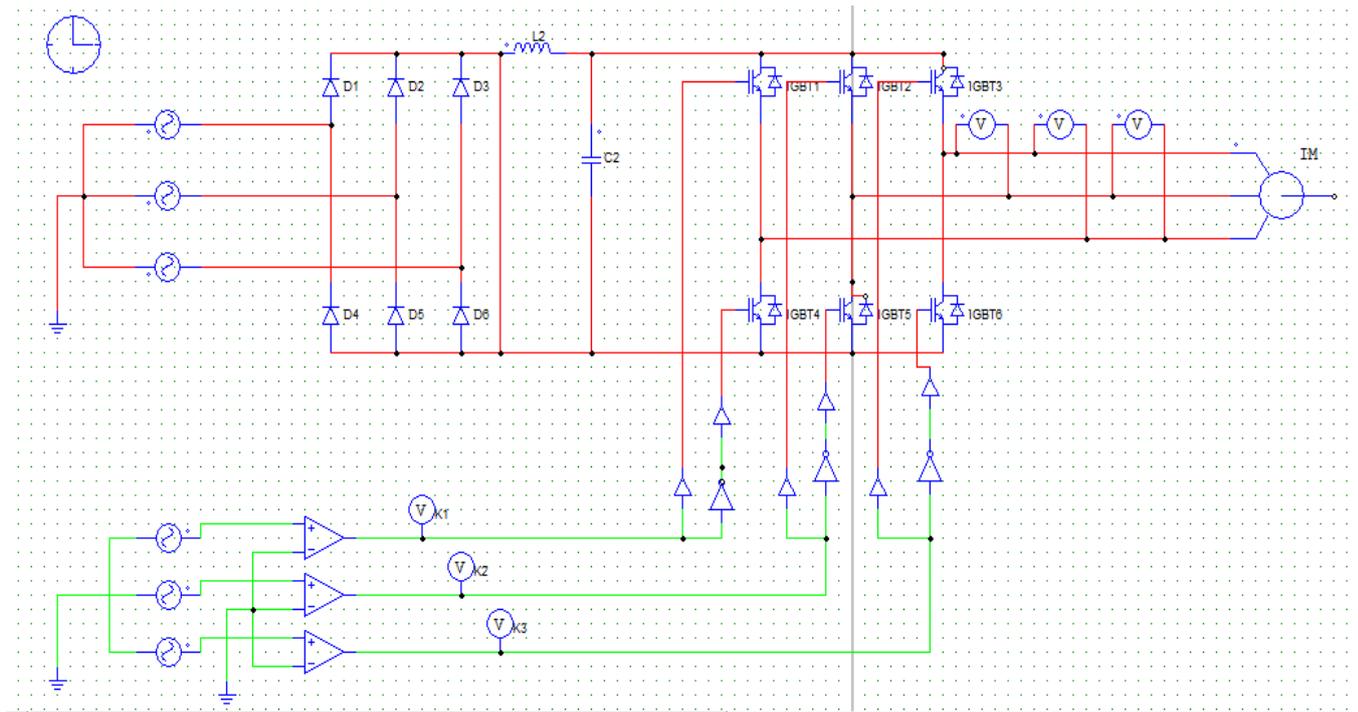


Figure III.8 : Schéma de principe du moteur commandé en pleine onde

Dans la méthode de commande pleine onde (180°), les interrupteurs sont activés pendant une moitié de période, ce qui signifie que chaque transistor conduit pendant 180° .

Pour illustrer ce fonctionnement, on compare un système de tension triphasé équilibré à la masse ($0V$), par la suite à la sortie des comparateurs, on trouve trois (03) signaux de commande K_1 , K_2 et K_3 de façon à ce que deux transistors dans un même bras sont amorcés à 180° de déphasage. Les transistors du bras voisin sont amorcés à 120° de déphasage. Cette stratégie de commande est exposée dans la Figure III.9 sur deux périodes.

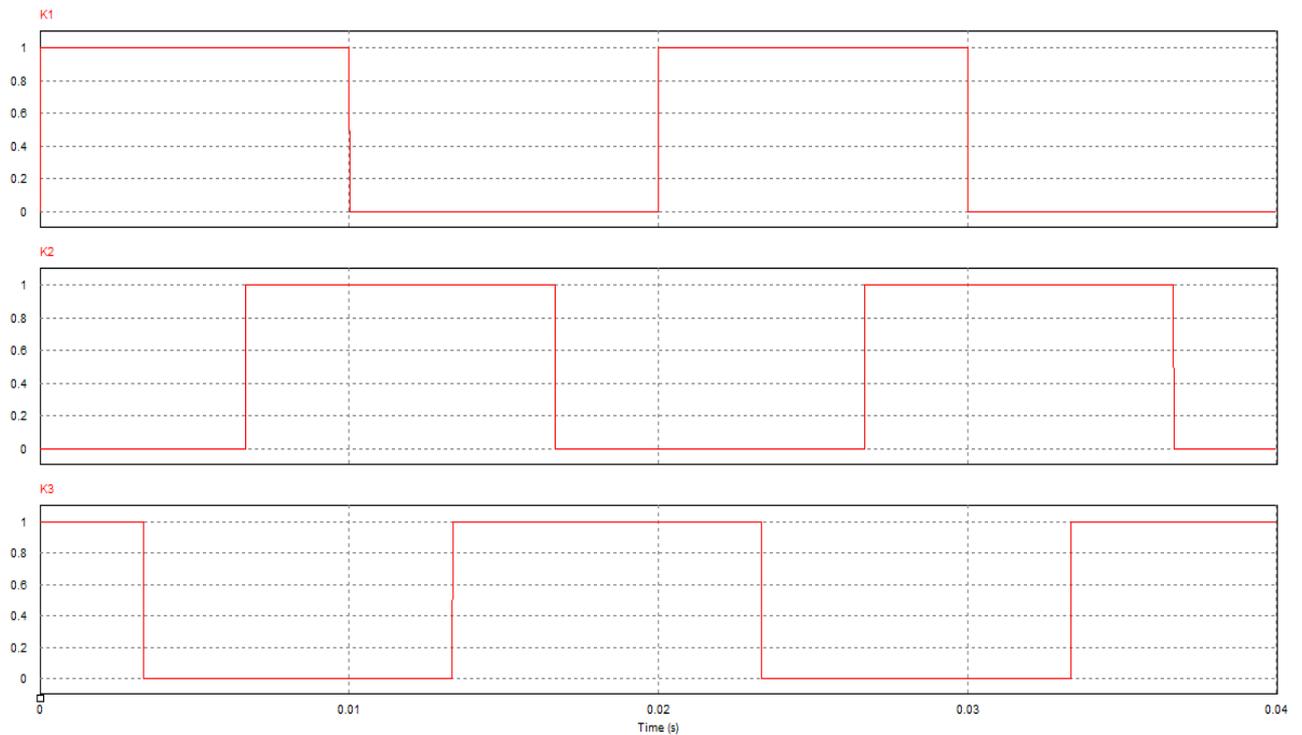


Figure III.9 : Les signaux de commande K_1 , K_2 et K_3

b. Allures des tensions composées

Par la suite, on analyse les formes d'ondes des tensions composées U_{12} , U_{13} et U_{23} en utilisant les signaux de commande K_1 , K_2 et K_3 . On connecte des voltmètres entre les différentes phases afin d'évaluer les tensions U_{12} , U_{13} et U_{23} (voir la Figure III.10).

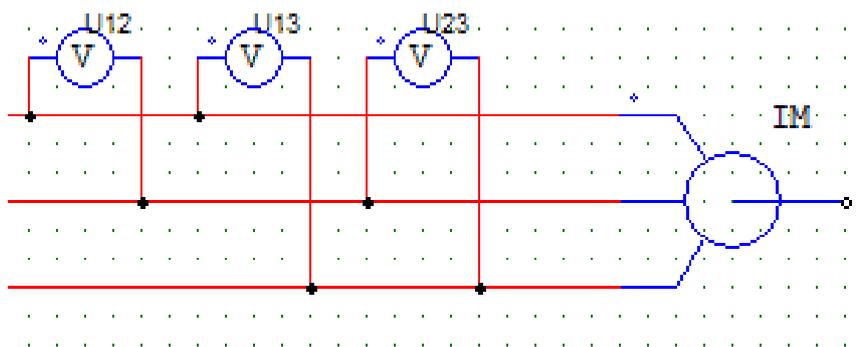


Figure III.10 : Branchement des voltmètres pour l'évaluation des tensions composées entre phases U_{12} , U_{13} et U_{23}

Nous obtenons les courbes des tensions suivantes :

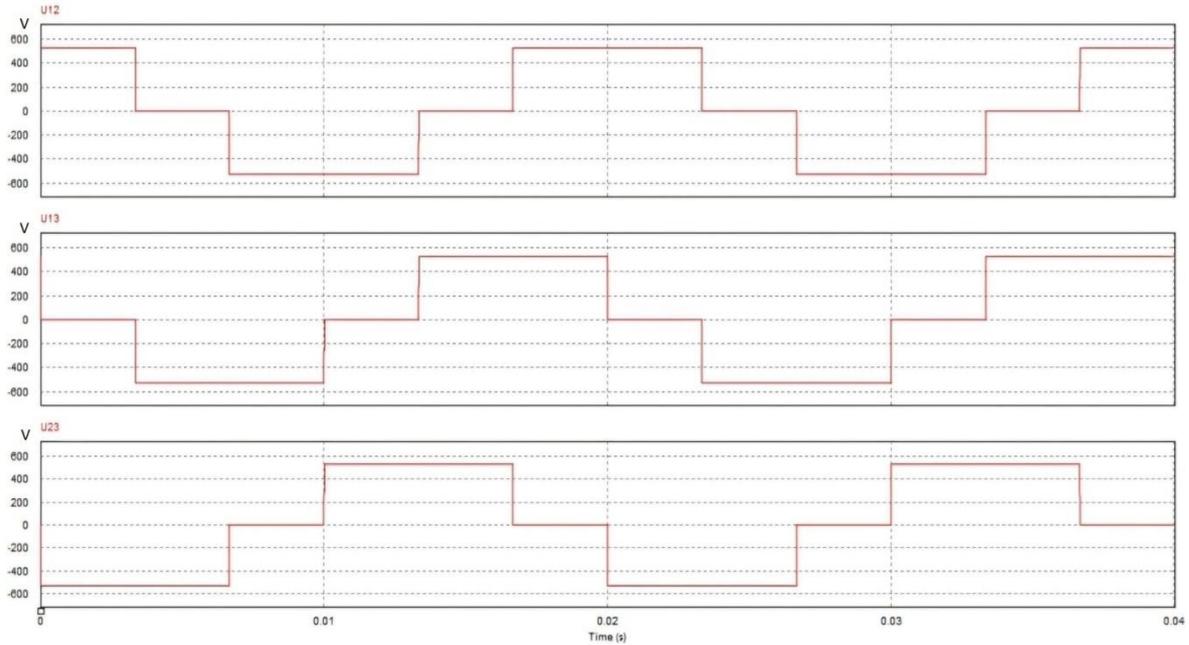


Figure III.11 : Allures des tensions composées U_{12} , U_{13} et U_{23}

Dans la Figure III.11 ci-dessus, les termes composés présentent des formes d'ondes qui ne sont pas sinusoïdaux. Les tensions obtenues ont une forme rectangulaire remplie d'harmoniques, allant de $+V_{dc}$ à $0, -V_{dc}$. Il est donc nécessaire d'utiliser un filtre afin d'extraire sa base avec la même fréquence.

Le tableau suivant est obtenu à partir des allures des tensions composées U_{12} , U_{13} et U_{23} et des signaux de commande K_1 , K_2 et K_3 .

Tableau III.1 : Les tensions composées et signaux de commande

K_1	K_2	K_3	U_{12}	U_{23}	U_{13}
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	$-V_{dc}$	$+V_{dc}$
0	1	0	$-V_{dc}$	$+V_{dc}$	0
0	1	1	$-V_{dc}$	0	$+V_{dc}$
1	0	0	$+V_{dc}$	0	$-V_{dc}$
1	0	1	$+V_{dc}$	$-V_{dc}$	0
1	1	0	0	$+V_{dc}$	$-V_{dc}$
1	1	1	0	0	0

c. Allures des tensions simples

Pour simuler les tensions simples V_{1s} , V_{2s} et V_{3s} , nous allons placer le voltmètre par chaque phase, comme le montre la figure suivante :

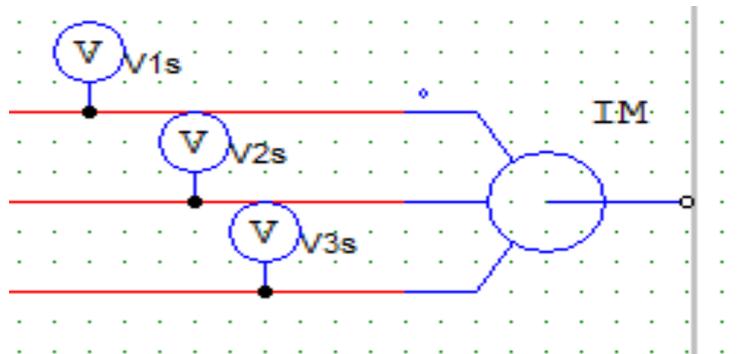


Figure III.12 : Branchements des voltmètres sur les phases

La figure III.13 ci-dessous illustre la simulation des tensions simples. Ces graphiques montrent que les trois tensions simples ont une forme en marches d'escalier avec une amplitude de $\frac{2}{3} \times V_{dc}$ et une période T identique à celles des tensions composées. Elles présentent un déphasage de 120° entre elles.

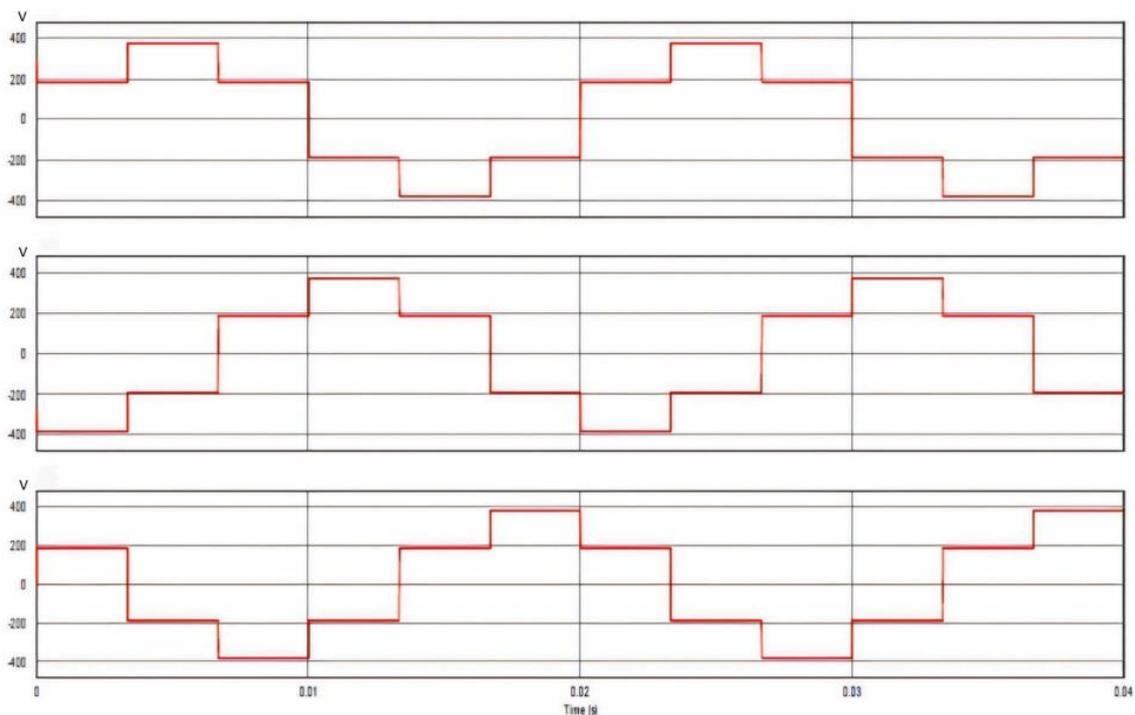


Figure III.13 : Les tensions simples V_{1s} , V_{2s} et V_{3s}

En observant les formes des tensions simples et composées, on remarque qu'un onduleur triphasé contrôlé avec une commande à 180° , permet de régler la fréquence des tensions composées et simples. Cependant, il n'est pas possible de régler les valeurs efficaces.

d. Les allures des courants statoriques I_1 , I_2 et I_3

Pour mesurer les courants statoriques I_1 , I_2 et I_3 , on va placer un ampèremètre par chaque phase.

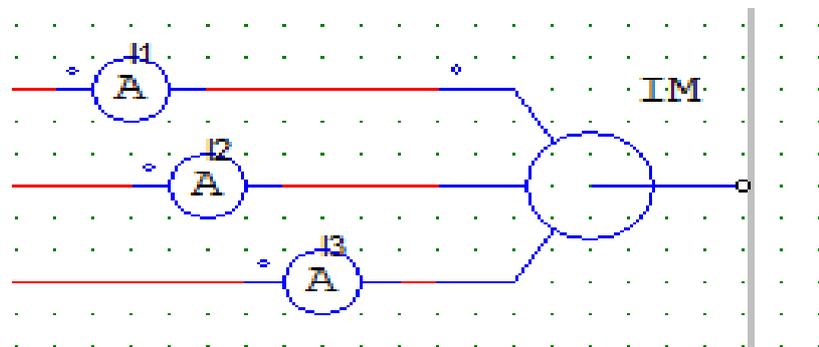


Figure III.14 : Branchement des ampèremètres

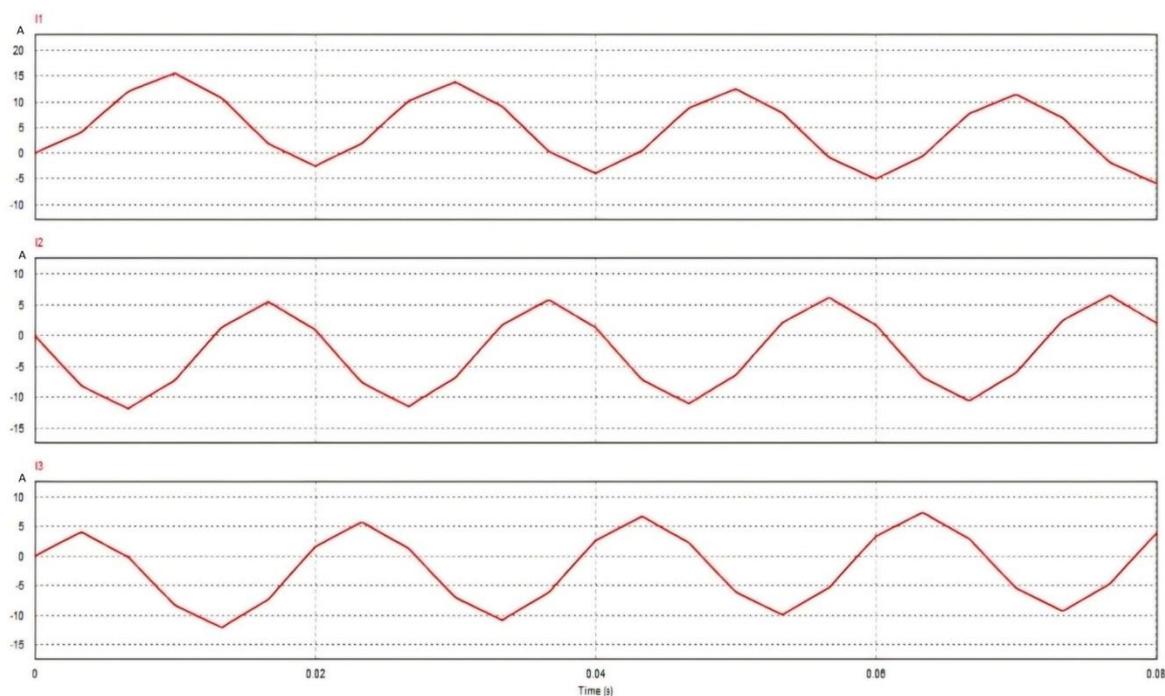


Figure III.15 : Allures des courants I_1 , I_2 et I_3

On remarque à partir de la figure III.15 que les courants statoriques ne sont pas sinusoïdaux. Ces derniers ont des harmoniques. Le filtrage avec le circuit LC est difficile dans ce cas, car les harmoniques ne sont pas suffisamment écartées du signal principal. Cela nécessite l'utilisation de filtres complexes, ce qui est difficile à réaliser. Par conséquent, on opte pour une autre approche de contrôle qui est la modulation de largeur d'impulsion (MLI).

III.3.4.2 Commande MLI d'une machine asynchrone

La stratégie de modulation de largeur d'impulsion (MLI) par rapport à la pleine onde, permet de créer des tensions variables en amplitude et en fréquence pour la machine à partir du réseau standard. La méthode de commande MLI la plus courante est la sinus-triangle.

a. Présentation du système d'étude contrôlé par la commande MLI

Le principe de la commande MLI est le suivant : celle-ci compare un signal haute fréquence, appelé porteuse, avec un signal de basse référence (voir figure III.16), pour générer la tension souhaitée à la sortie du convertisseur tout en éliminant les harmoniques.

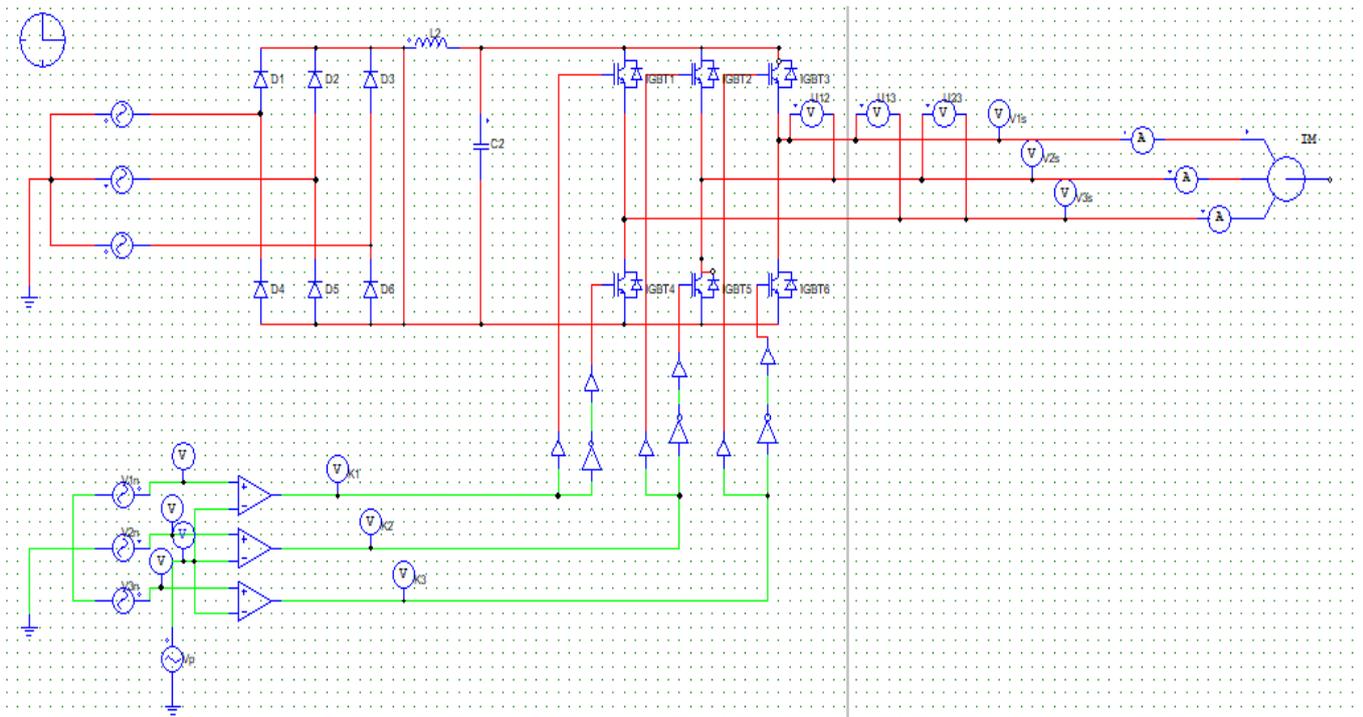


Figure III.16 : Schéma du principe du moteur avec commande MLI

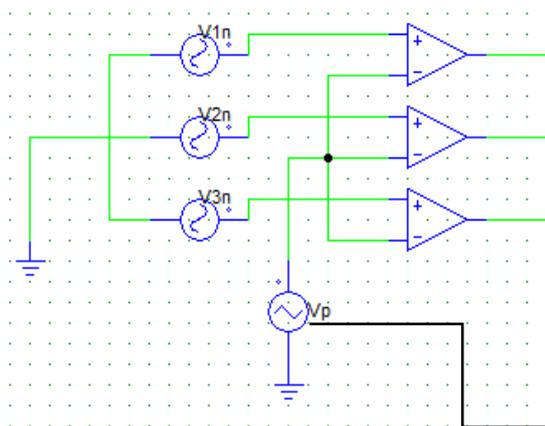


Figure III.17 : Porteuse triangulaire haute fréquence.

Le signal de la porteuse est illustré dans la figure III.18 ci-dessous, tandis que les tensions de référence sont affichées dans la figure III.19.

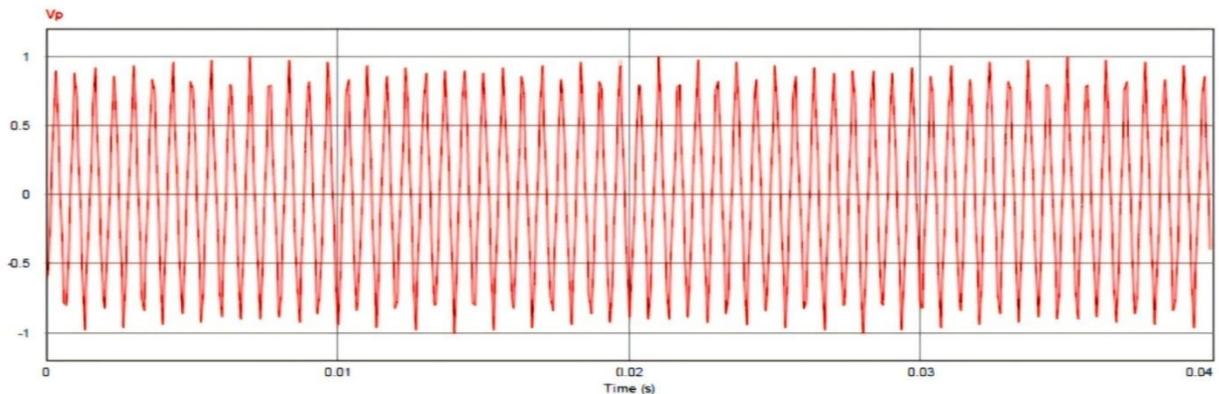


Figure III.18 : Simulation du signal porteuse

La figure suivante montre les formes d'ondes des tensions de référence, V_{1n} , V_{2n} et V_{3n} , décalées de $\frac{2\pi}{3}$ à la même fréquence f .

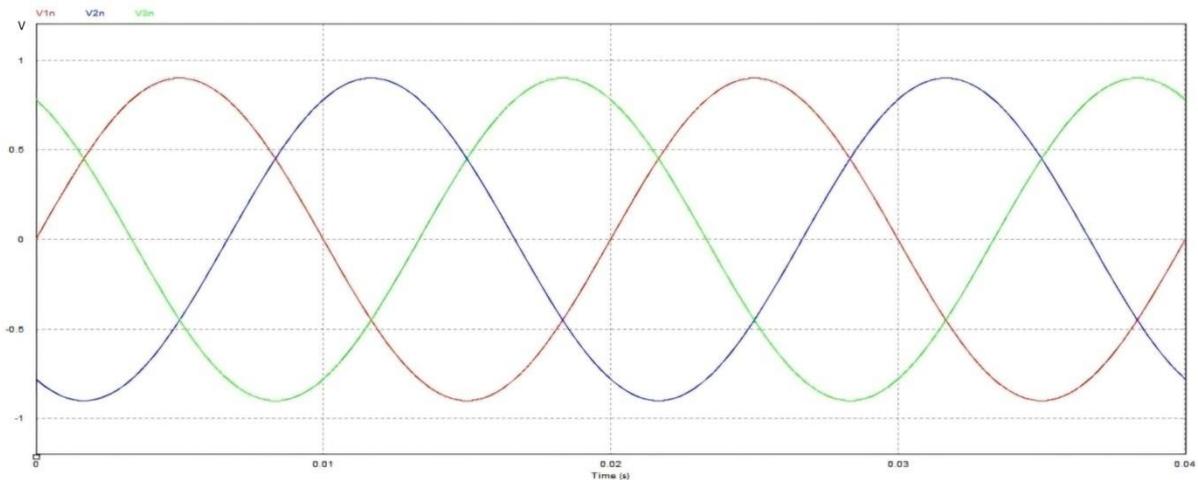


Figure III.19 : Simulation des tensions de référence V_{1n} , V_{2n} et V_{3n} ,

La figure III.20 montre comment fonctionne le principe de la MLI sinus-triangle sur une seule période. Les moments où la tension de référence croise la porteuse indiquent quand ouvrir ou fermer les interrupteurs. On compare la référence (en bleu) avec la porteuse triangulaire (en rouge). Si la référence est plus élevée que la porteuse, le signal de sortie de l'interrupteur K_1 est 1, sinon il est 0. Ainsi, le signal de sortie change à chaque croisement de la référence et de la porteuse. Les formes d'onde des autres signaux de commande K_2 et K_3 sont présentées dans la figure III.21.

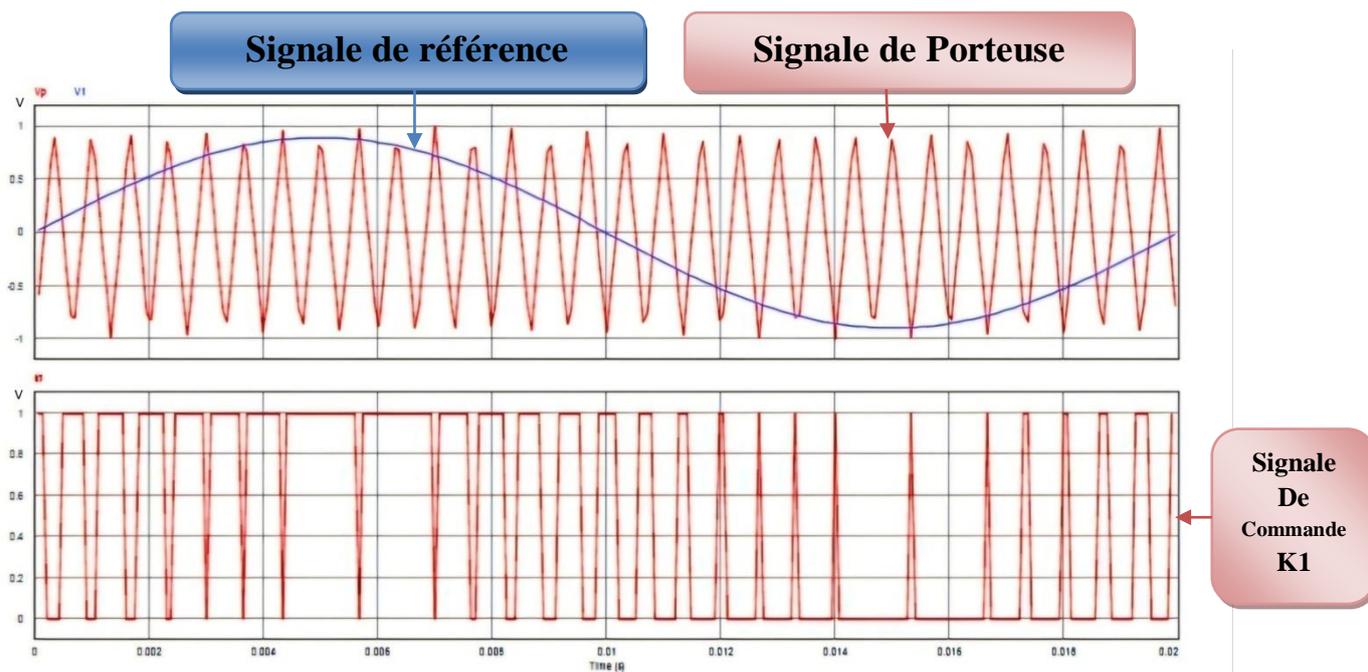


Figure III.20 : Principe de la commande MLI à porteuse en dents de scie

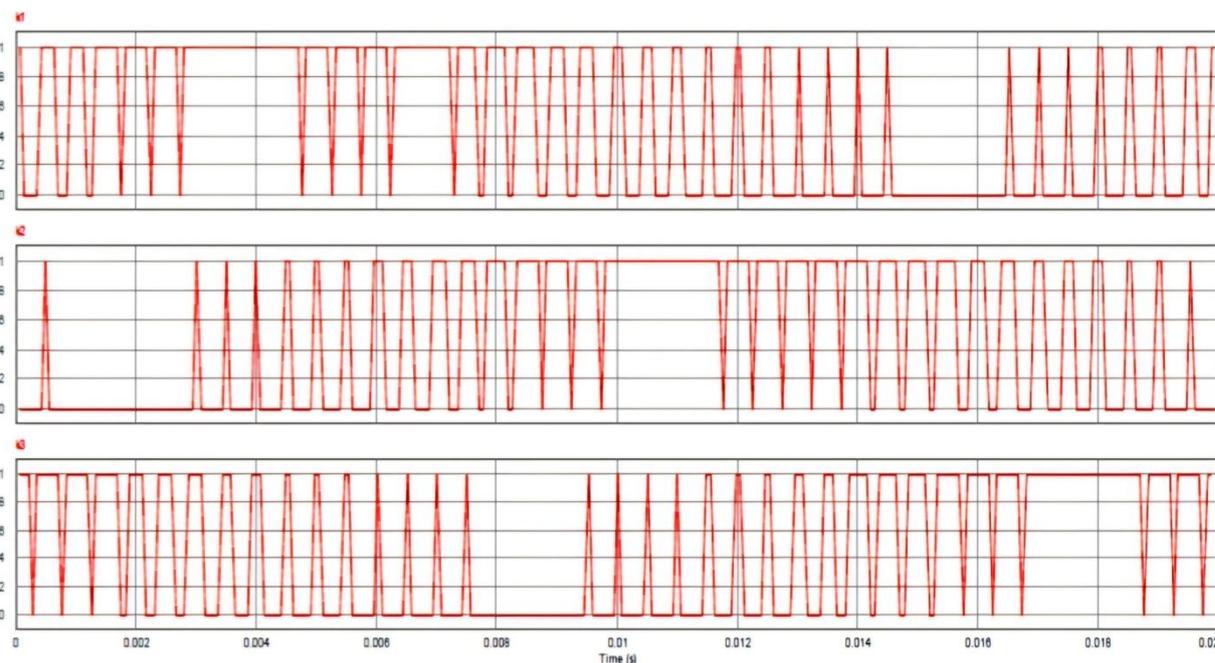


Figure III.21 : Les signaux de commande K_1 , K_2 et K_3

b. Allures des tensions composées

La figure III.22 illustre la simulation des tensions composées U_{12} , U_{13} et U_{23} , tandis que les tensions simples V_{1s} , V_{2s} et V_{3s} sont présentées dans la figure III.23.

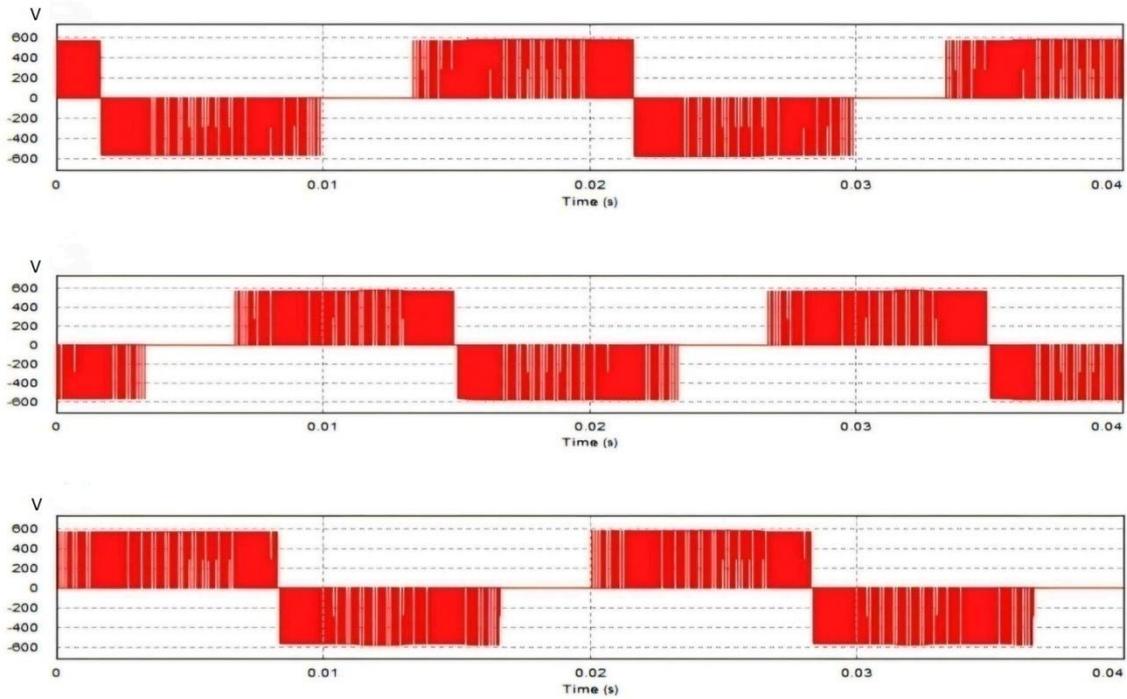


Figure III.22 : Tracés des tensions composées U_{12} , U_{13} et U_{23}

c. Allures des tensions simples

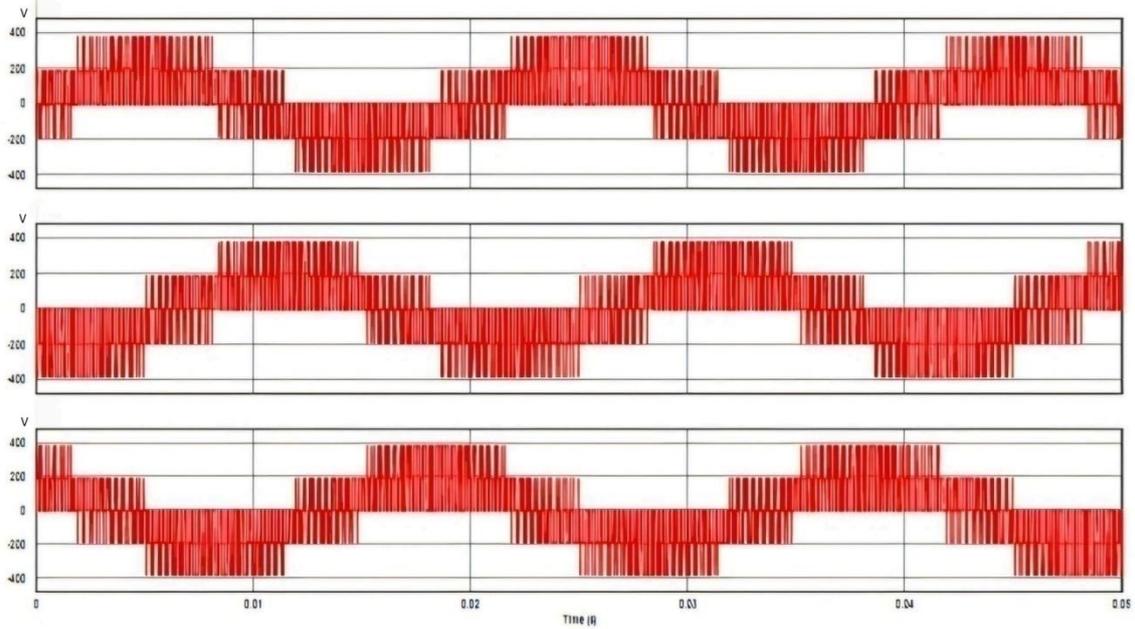


Figure III.23 : Tracés des tensions simples V_{1s} , V_{2s} et V_{3s}

d. Les allures des courants statoriques I_1, I_2 et I_3

Les allures des courants statoriques I_1, I_2 et I_3 sont présentés dans la figure III.24.

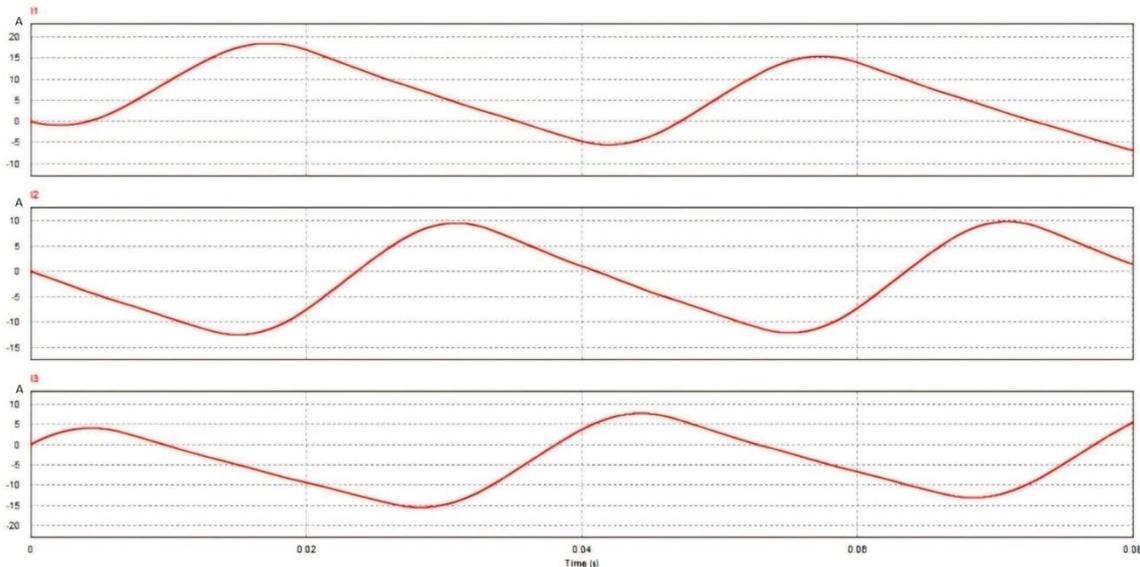


Figure III.24 : Allures des courants I_1, I_2 et I_3

Les simulations montrent que l'utilisation d'un onduleur à MLI pour alimenter le moteur réduit les ondulations et les harmoniques. Ainsi, il est évident que la MLI offre des performances bien meilleures que la commande pleine onde. En effet, l'onduleur à MLI permet de régler à la fois la fréquence et l'amplitude de la tension du moteur. De plus, pour éliminer les harmoniques générées par la commande pleine onde, l'utilisation des filtres passe-bas est nécessaire, mais cela n'est réalisable qu'avec la MLI.

III.4 Conclusion

Dans ce troisième chapitre, nous avons effectué la simulation des différents composants du variateur de vitesse de la machine asynchrone à l'aide l'environnement PSIM. Nous avons pour cela, entamé notre étude par l'utilisation de la commande pleine onde pour le contrôle de la machine, la commande investiguée s'est avérée moins performante car celle-ci certes elle permet le réglage de la fréquence mais pas l'amplitude du signal. Par la suite, nous avons étudié une méthode de contrôle qui est la commande MLI sinus-triangle, celle-ci comparée à la commande pleine onde à 180° a mis en évidence son efficacité car la MLI permet le réglage au même temps de la fréquence et de l'amplitude du signal.

Dans le prochain chapitre, nous prévoyons d'implémenter la commande MLI où nous passerons à la mise en pratique de la variation de vitesse.

CHAPITRE IV

***Conception et réalisation d'un
variateur de vitesse pour un moteur
asynchrone triphasé***

Chapitre IV

Conception et réalisation d'un variateur de vitesse pour un moteur asynchrone triphasé

IV.1 Introduction

L'objectif de ce dernier chapitre est de concevoir et de mettre en œuvre un variateur de vitesse basé sur un onduleur à modulation de largeur d'impulsion (MLI), dont le principe a été investigué dans le chapitre précédent, et ceci pour un moteur asynchrone triphasé, piloté par un Arduino. Nous allons pour cela, donner une description générale de la carte Arduino, puis une simulation est effectuée sur le logiciel **PROTEUS** des circuits électriques développés. Enfin, la réalisation pratique de la carte de commande est mise en œuvre en utilisant le logiciel **EAGLE**.

IV.2 Généralités sur les cartes Arduino

IV.2.1 Présentation

L'Arduino est une carte intégrant tous les composants nécessaires au fonctionnement du microcontrôleur. Pour l'utiliser et la programmer, il suffit de la connecter à un ordinateur via un câble USB. Cette carte dispose de :

- 54 broches numériques d'entrées/sorties (dont 14 peuvent être utilisées en sorties MLI(ou PWM).
- 16 entrées analogiques (qui peuvent également être utilisées en broches entrées/sorties numériques).
- 4 Port série matériel.
- Connecteur d'alimentation jack.
- Connexion USB.
- Bouton de réinitialisation (reset).
- Quartz 16Mhz.
- Connecteur ICSP (programmation "in-circuit").

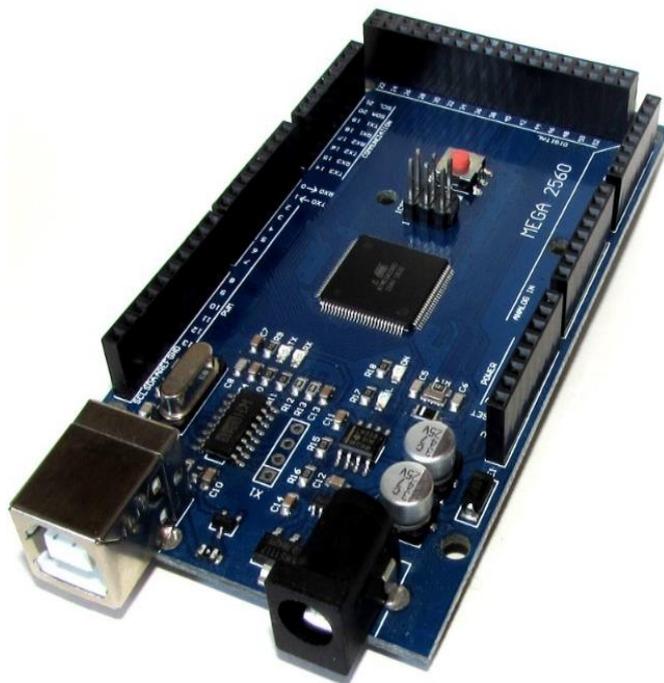


Figure IV.1 : Carte Arduino Mega

IV.2.2 Spécifications techniques

Les spécifications de la carte Arduino Mega sont comme suit :

- Microcontrôleur : ATmega2560
- Tension de fonctionnement : 5 V
- Gamme de tension d'entrée : 7-12 V
- Pins d'entrée analogique : 16
- Mémoire flash : 256 KB
- Pins digitaux I/O : 54
- Fréquence d'horloge de l'oscillateur à quartz : 16 MHz
- Dimensions : 101,52 x 53,3 mm
- Poids : 37 g

IV.3 Simulation du programme sur PROTEUS

IV.3.1 Organigramme du programme Arduino

Nous présentons ci-dessous un organigramme décrivant le programme de simulation sur PROTEUS :

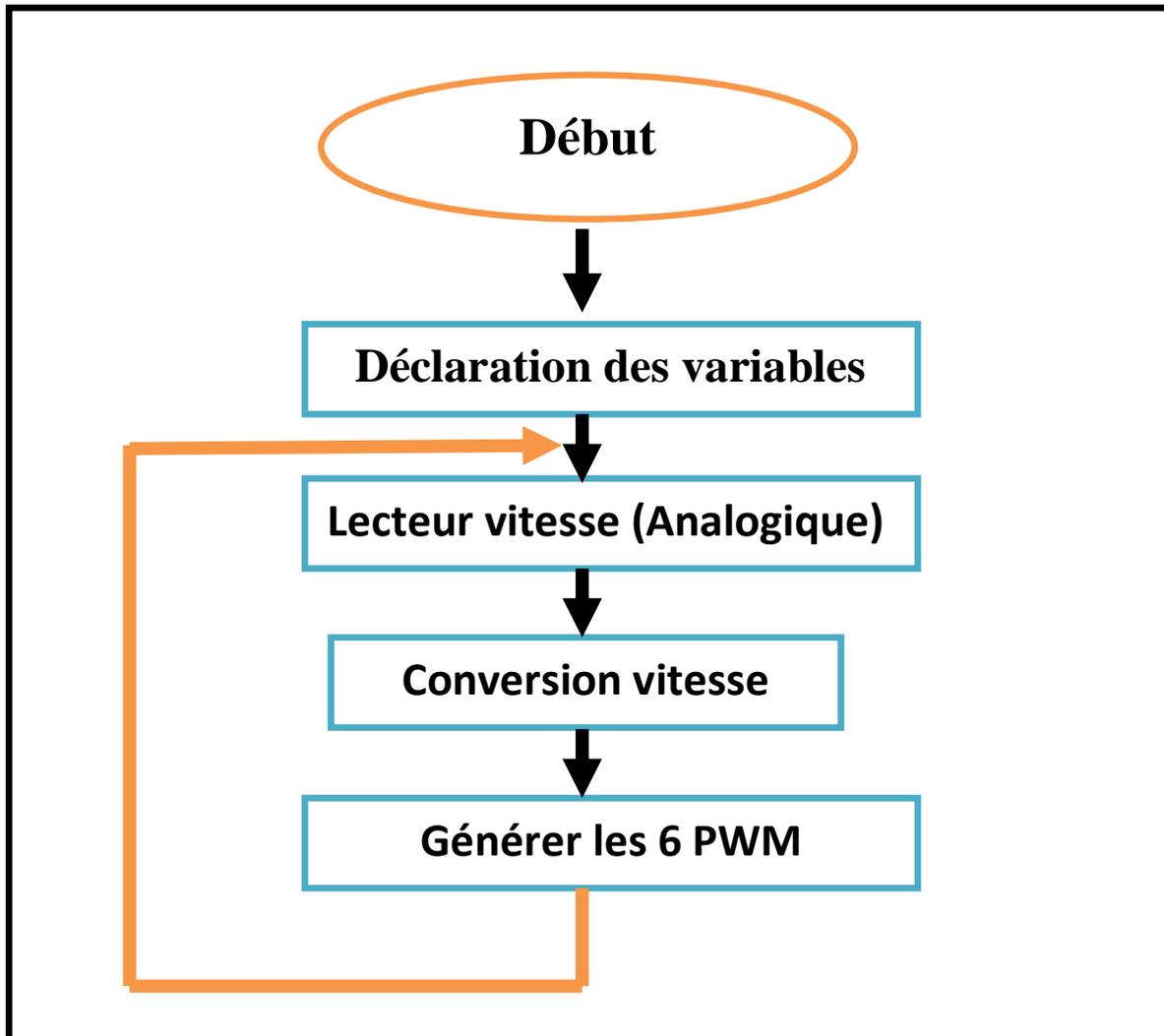


Figure IV.2 : Organigramme du programme Arduino

IV.3.2 Schéma de simulation

Le schéma de simulation sur PROTEUS est composé de :

- La carte Arduino Mega
- Un potentiomètre 1K pour varier la fréquence des signaux de commande (6 PWM)
- Six optocoupleurs
- Deux oscilloscopes pour visualiser les signaux.

Le schéma de simulation est décrit par la figure suivante :

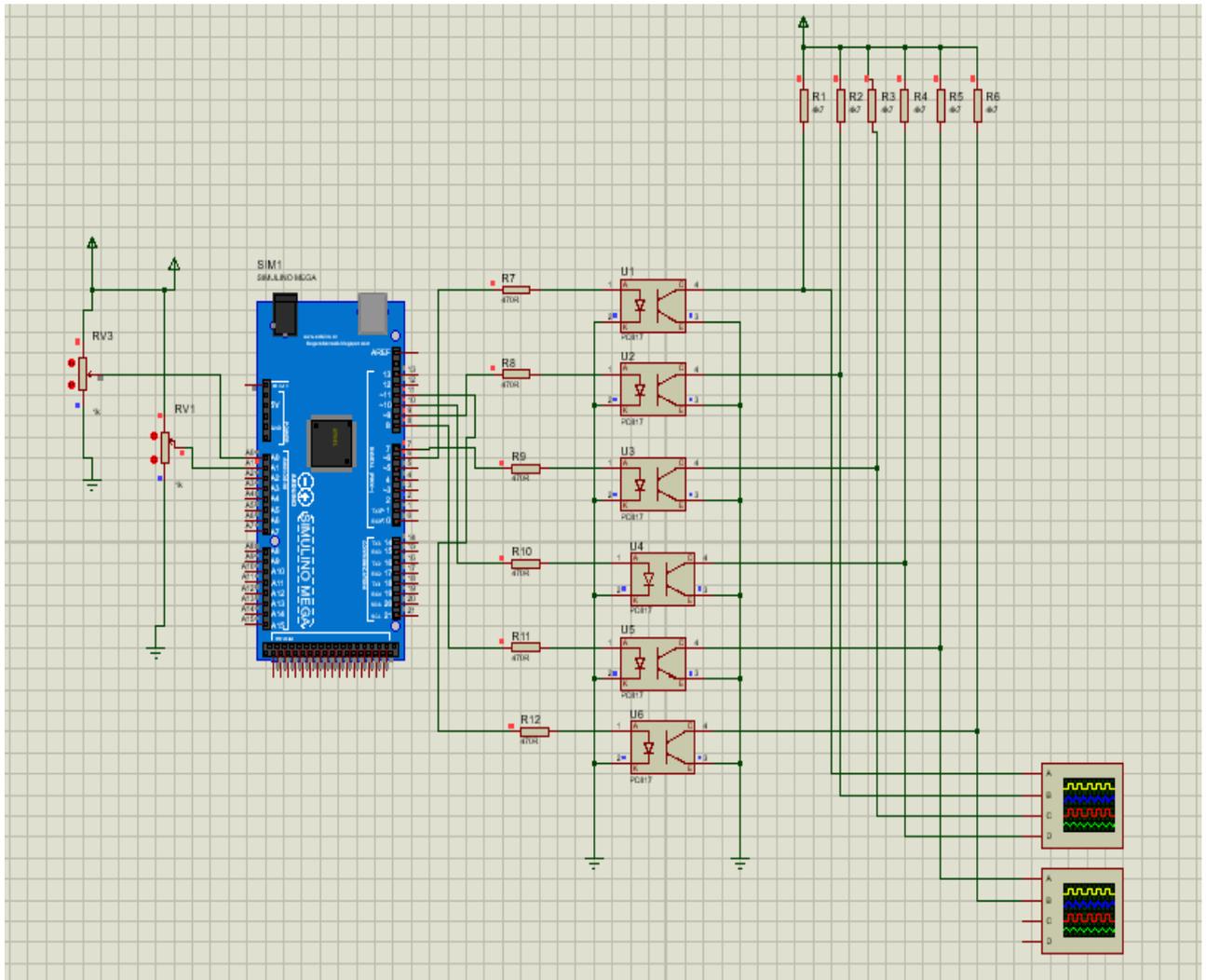


Figure IV.3 : Schéma de simulation du programme sur PROTEUS

IV.3.3 Résultats de simulation

Dans ce qui suit, nous allons prendre les réponses des six signaux de commande qui sont affichés par l'oscilloscope par la notation PH1-PH6. Nous allons effectuer trois simulations en variant la vitesse.

IV.3.3.1 Vitesse maximale

Ci-dessous les réponses des six signaux de commande PH1-PH6 pour une vitesse maximale :

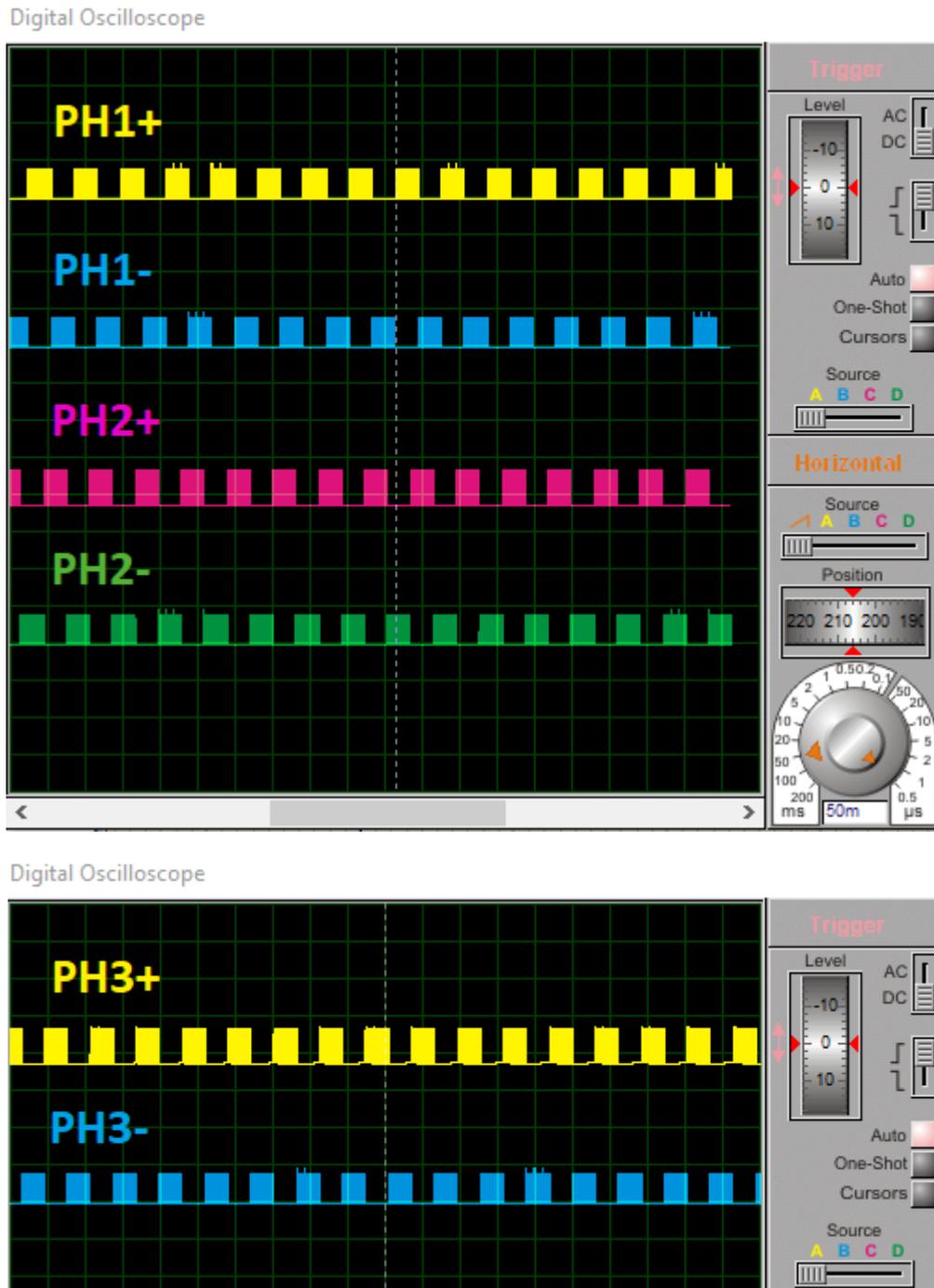


Figure IV.4 : Les 6 signaux de commande PWM avec Vitesse maximale

IV.3.3.2 Vitesse moyenne

Ci-dessous les réponses des six signaux de commande PH1-PH6 pour une vitesse moyenne :

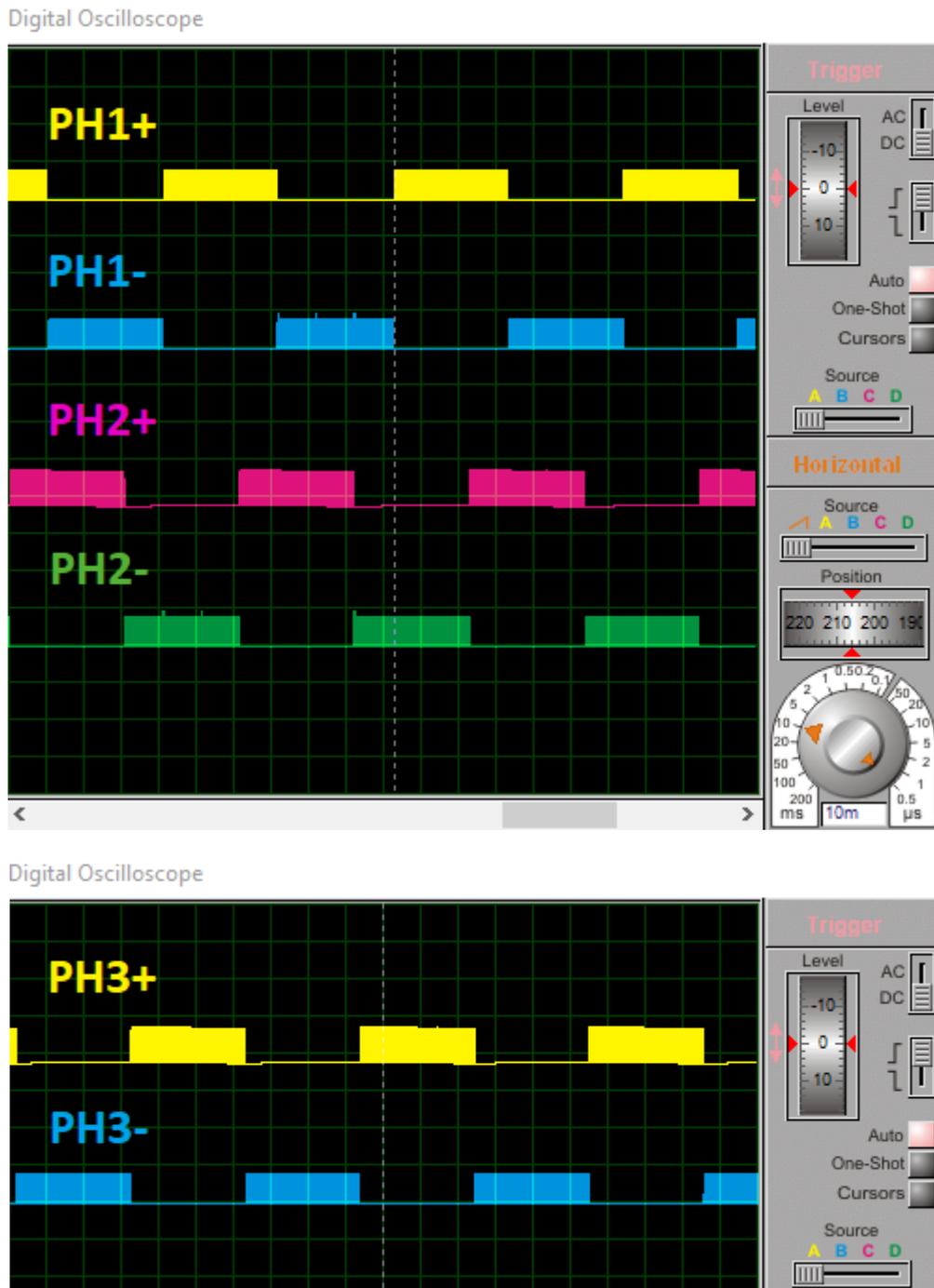


Figure IV.5 : Les 6 signaux de commande PWM avec Vitesse moyenne

IV.3.3.3 Vitesse minimale

Ci-dessous les réponses des six signaux de commande PH1-PH6 pour une vitesse minimale :

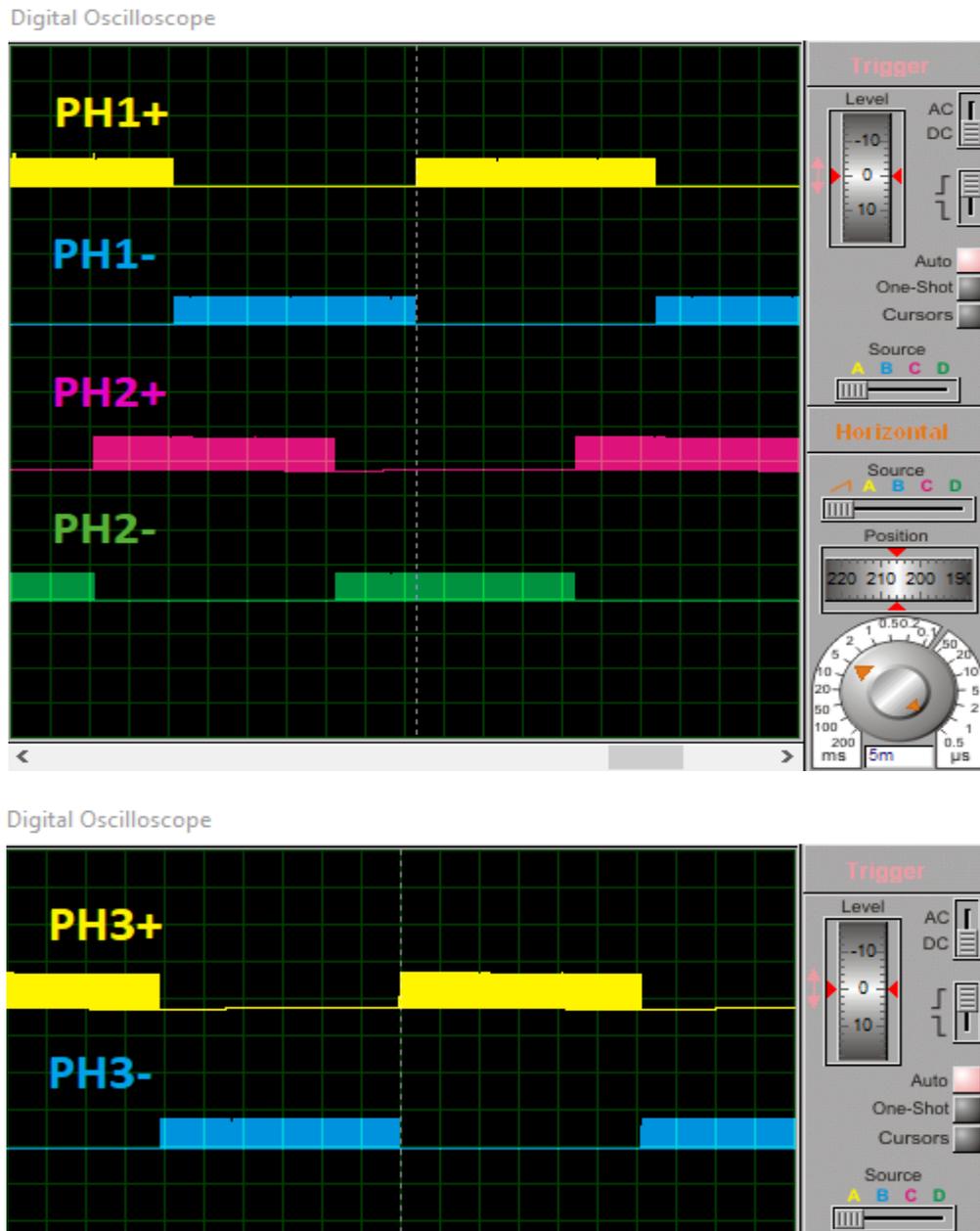


Figure IV.6 : Les 6 signaux de commande PWM avec Vitesse minimale

Nous remarquons que lorsque la vitesse augmente, la période diminue, ce qui se traduit par un nombre de périodes par minute plus élevé. Comme la fréquence correspond au nombre de périodes par seconde ($F = 1/T$), nous concluons que la relation entre la fréquence et la vitesse est directe : plus la vitesse augmente, plus la fréquence augmente, et inversement.

IV.4 Conception et réalisation pratique

Ci-dessous le schéma synoptique du projet, celui-ci comprend deux cartes, une carte de commande qui inclue la carte Arduino, les optocoupleurs et le driver IR2110 et une carte de puissance comprenant les six IGBT et le moteur asynchrone triphasé pour l'application.

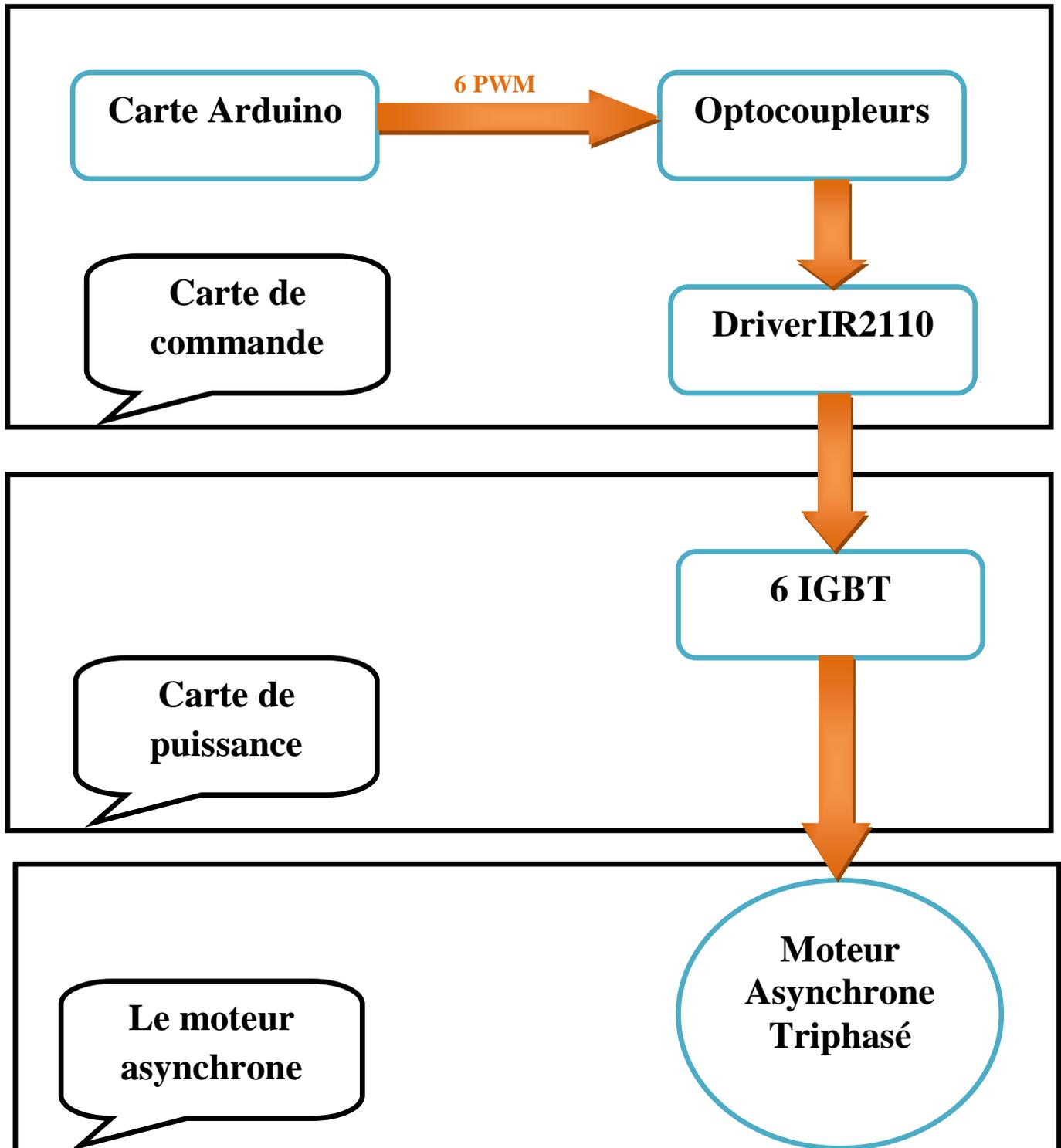


Figure IV.7 : Schéma synoptique

IV.4.1 Choix des composants électroniques

Le premier calcul est celui du courant nominal délivré par l'onduleur. Considérons la charge est un moteur asynchrone triphasé 230/400V, ce dernier est choisi de l'usine pour faire l'expérience afin de tester le variateur, avec un facteur de puissance de 0.7 et une puissance utile de 0.27 Kw. La plaque signalétique du moteur est donnée par la figure suivante :



Figure IV.8 : Plaque signalétique du moteur asynchrone triphasé

➤ Dans ce cas le courant nominal est calculé comme suit :

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \times U \times \cos \varphi} = \frac{270}{\sqrt{3} \times 400 \times 0,7} = 0,56 \text{ A} \quad (\text{IV.1})$$

IV.4.1.1 Carte de commande

Le schéma électronique de la carte de commande est réalisé par le logiciel EAGLE présenté par la **Figure IV.13**, ce dernier comporte :

a. Alimentation 5V

La carte Arduino est alimentée par une pile de 9V et la carte de commande est connectée via un bornier à 2 vis. On a besoin d'une alimentation en 5V, on a ajouté un régulateur de tension 7805.

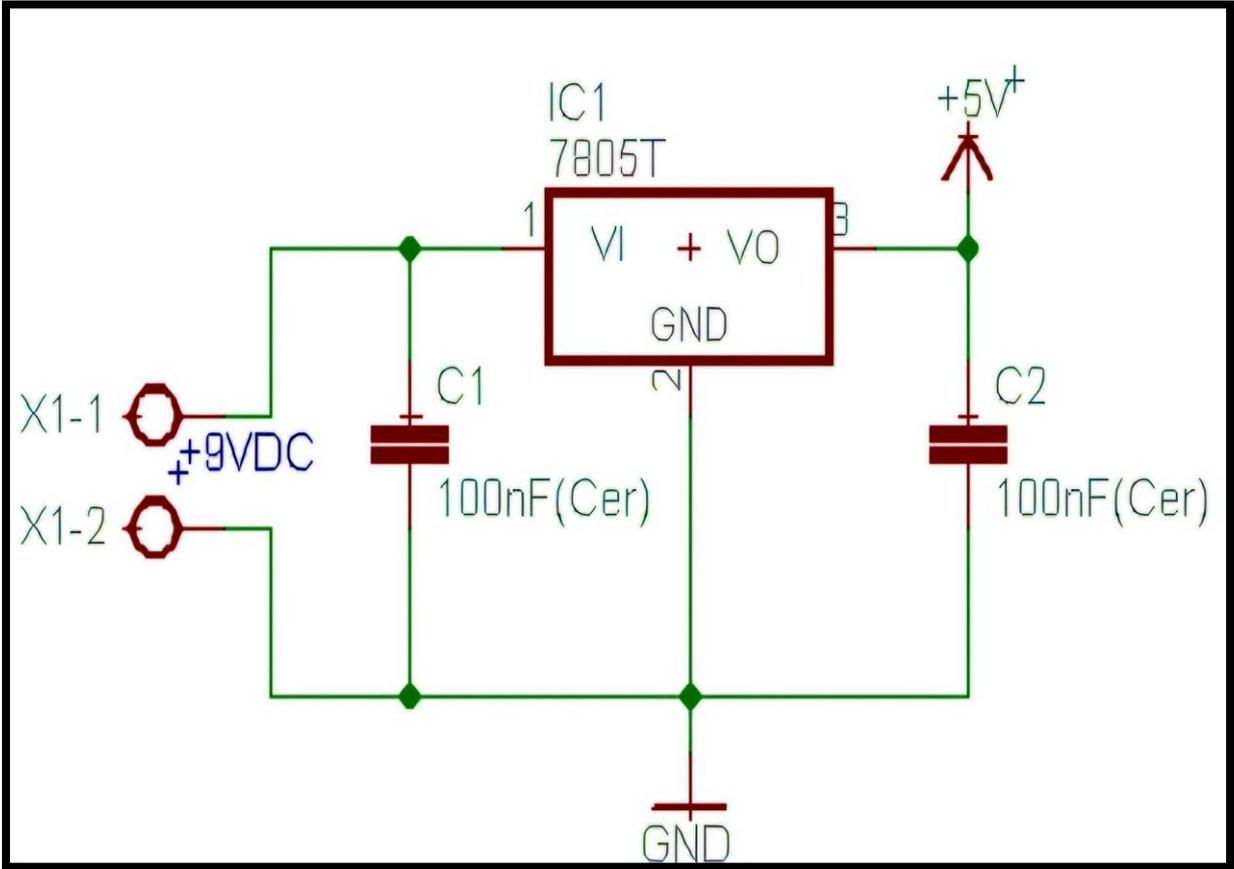


Figure IV.9 : Alimentation 5V DC



Figure IV.10 : Bornier à 2 vis

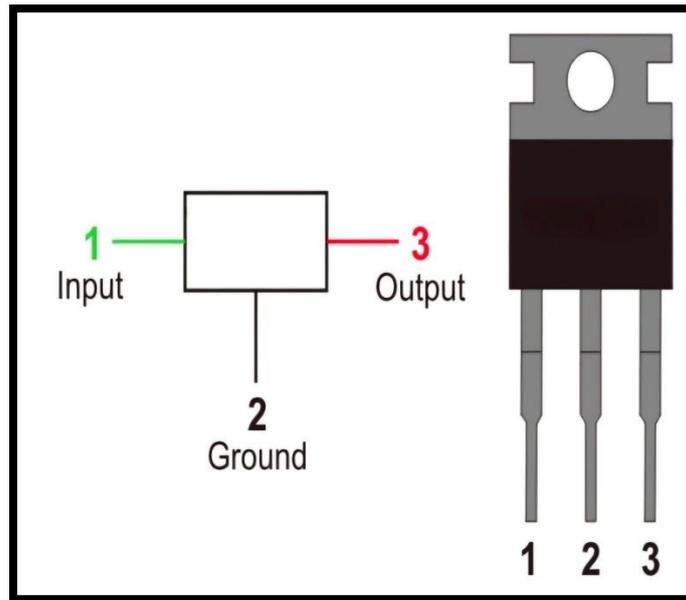


Figure IV.11 : Régulateur de tension 7805

b. Entrées/sorties Arduino Mega

La connexion entre la carte Arduino et la carte de commande se fait via des connecteurs headers mâles, illustrés par la figure suivante :



Figure IV.12 : Connecteurs headers mâles

Le schéma électrique de la carte de commande ainsi que des connexions Entrées/Sorties Arduino sont présentés par les figures IV.13 et IV.14 respectivement.

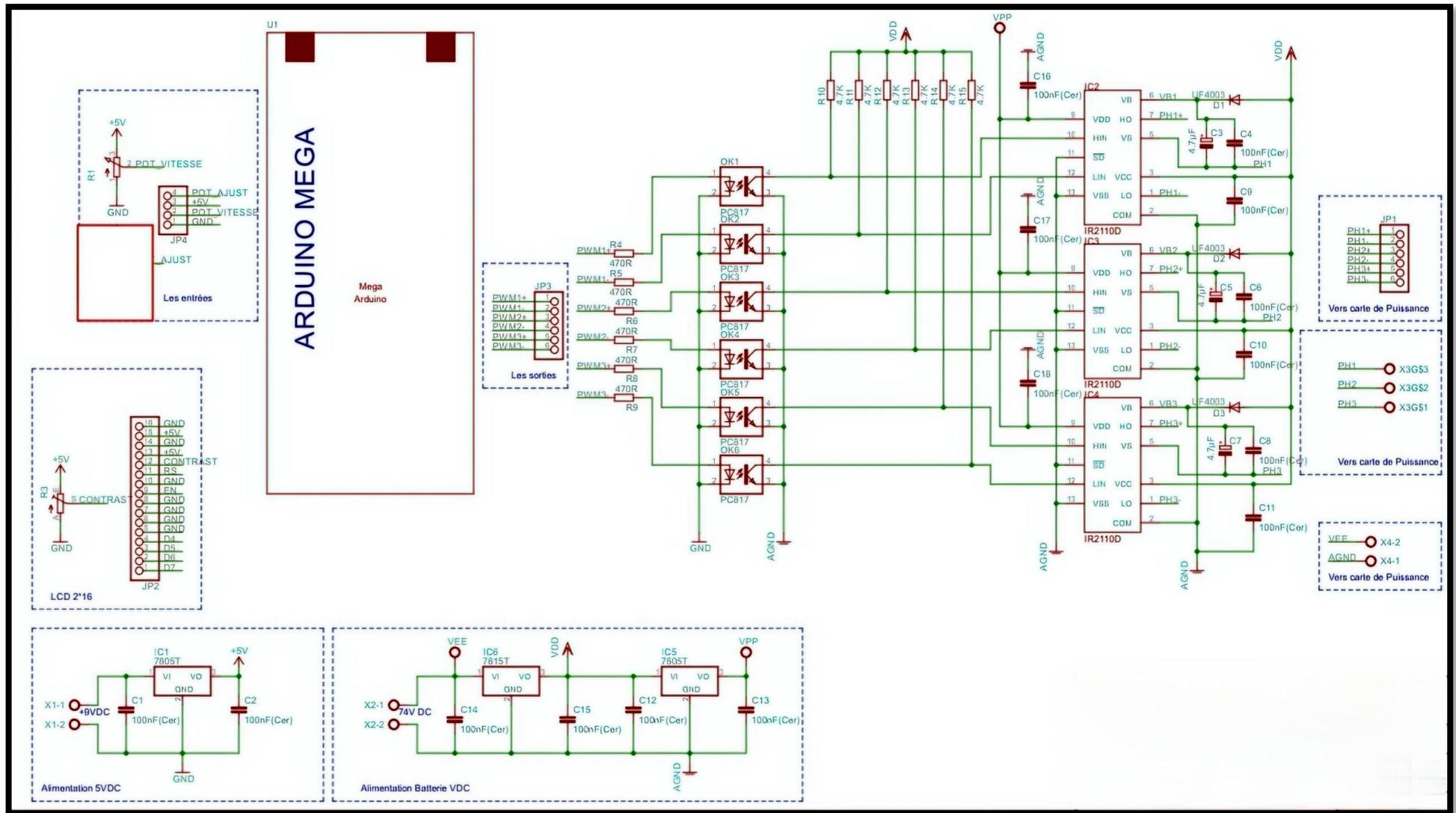


Figure IV.13 : Schéma électronique de la Carte de commande

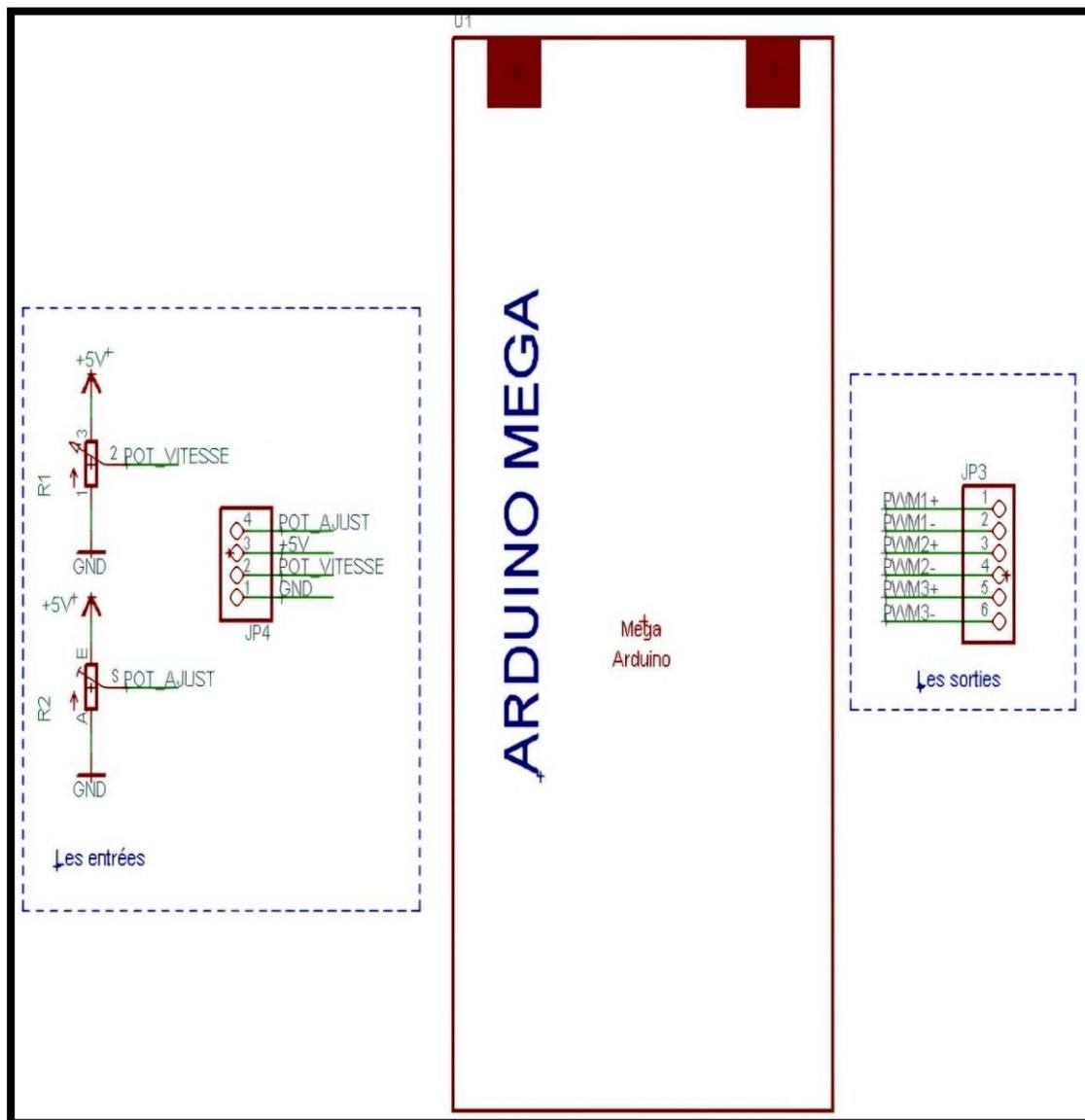


Figure IV.14 : Connexion entrées/sorties Arduino

c. Isolation galvanique avec PC817

L'isolation galvanique vise à éliminer tout lien électrique entre la carte Arduino (commande) et les six IGBT (puissance). Pour cela, on utilise six (06) optocoupleurs PC817 et séparer les masses. Ainsi, la commande a une masse commune notée GND et la puissance une autre masse notée AGND, indépendante de la première, comme le montre la **Figure IV.15**.

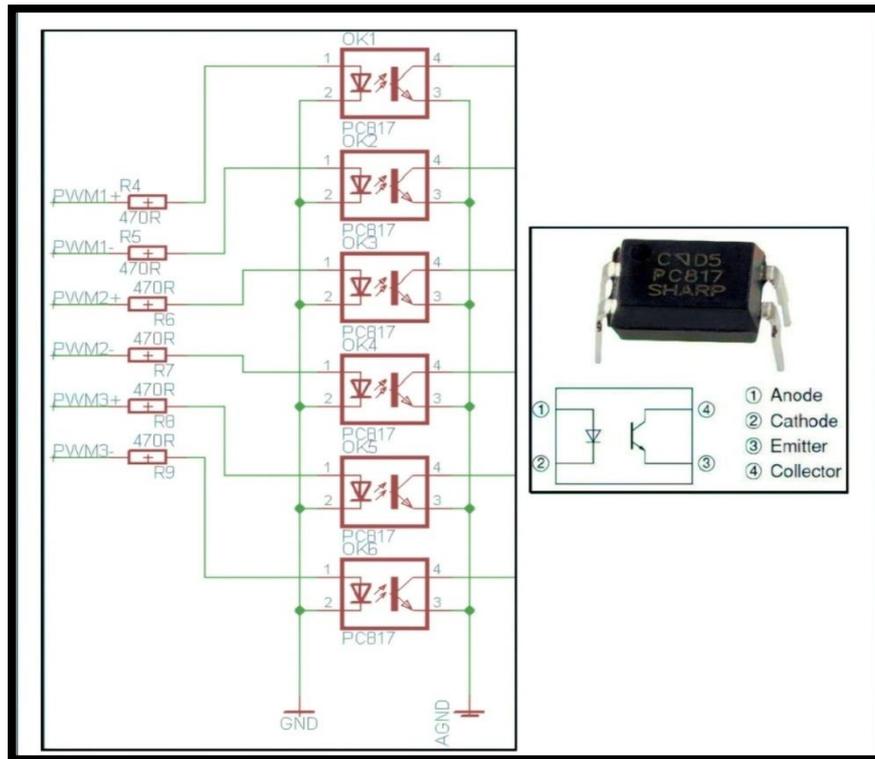


Figure IV.15 : Isolation galvanique par six (06) optocoupleurs PC817

L'optocoupleur PC817 contient une LED infrarouge et un phototransistor, isolés électriquement. Quand un courant passe dans la LED, elle émet de la lumière infrarouge dans un boîtier opaque. Cette lumière est captée par le phototransistor, qui devient alors conducteur, permettant ainsi de transmettre un courant tout en maintenant l'isolation électrique.

d. Driver IR2110

Le driver IR2110 est un circuit intégré conçu pour piloter des transistors de puissance comme les IGBT. Voici son fonctionnement simplifié :

- Deux Sections de Commande :
 - High-Side (Haute Tension) : Pilote le transistor connecté à la tension positive de l'alimentation.
 - Low-Side (Basse Tension) : Pilote le transistor connecté à la masse.
- Entrées Logiques :
 - HIN : Commande le transistor de haute tension.
 - LIN : Commande le transistor de basse tension.
 - SD (Shutdown) : Désactive les sorties du driver.

➤ Bootstrap Circuit :

Utilise un condensateur pour fournir une tension plus élevée que l'alimentation, nécessaire pour piloter le transistor de haute tension.

➤ Sorties :

- HO (High-Side Output) : Connecté à la grille du transistor de haute tension.
- LO (Low-Side Output) : Connecté à la grille du transistor de basse tension.

➤ Protection :

- Dead-Time Control : Empêche les transistors de haute et basse tension d'être activés en même temps pour éviter les courts-circuits.
- Protection contre les surtensions : Protège les transistors des tensions excessives.



Figure IV.16 : Driver IR2110

Le IR2110 reçoit des signaux logiques pour contrôler les transistors de haute et basse tension, utilise un circuit de Bootstrap pour la haute tension, et protège contre les courts-circuits et les surtensions, assurant une commutation sûre et efficace des transistors de puissance.

IV.4.1.2 Routage de la carte de commande

En utilisant le logiciel de conception EAGLE, on a réalisé le routage de la carte de commande sur un circuit imprimé simple face de 156 x 105 mm. Le schéma de montage de cette carte de commande, son routage et son typon sont donnés par les figures **IV.17**, **IV.18** et **IV.19** suivantes :

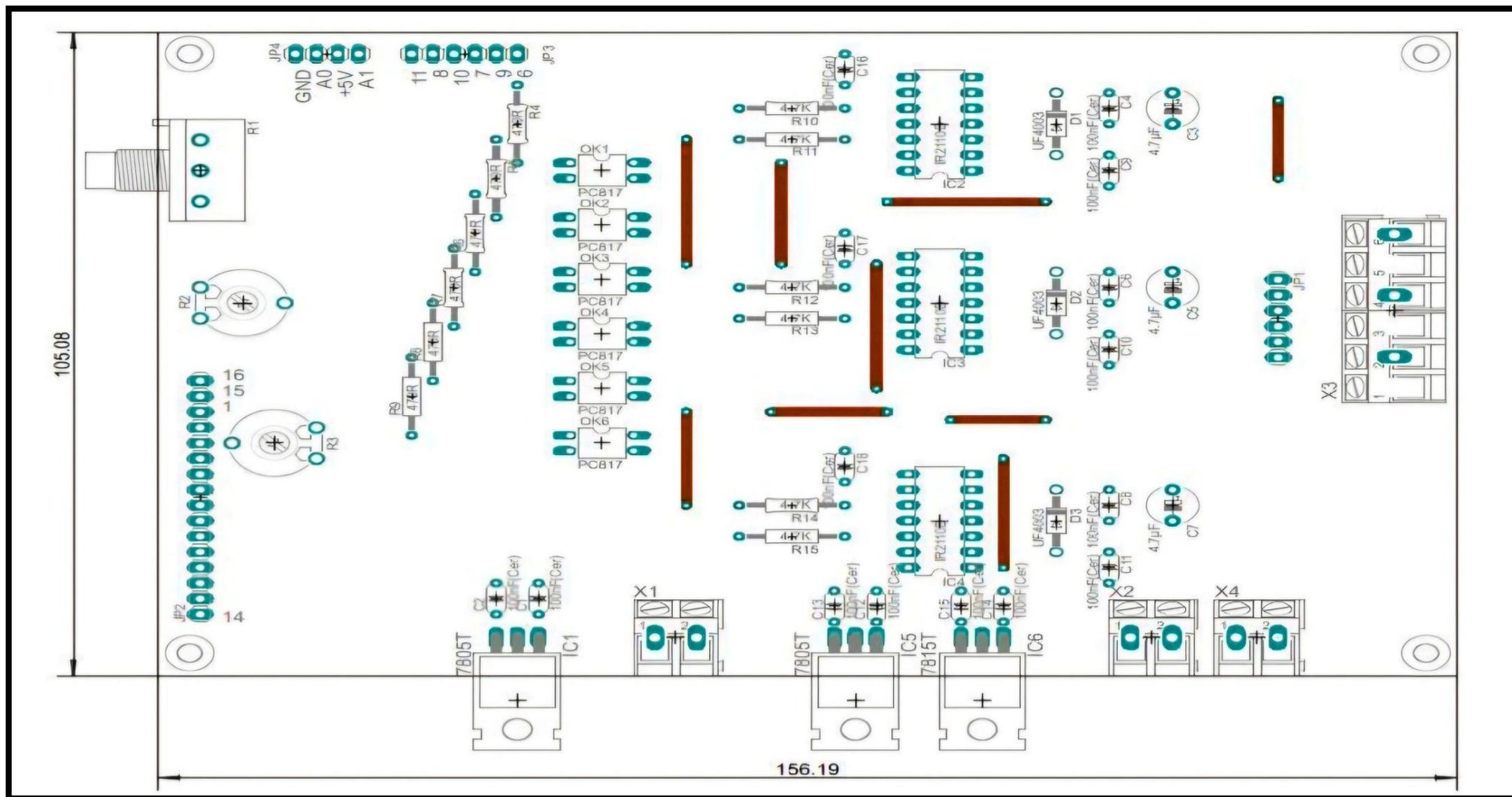


Figure IV.17 : Schéma du montage de la carte de commande

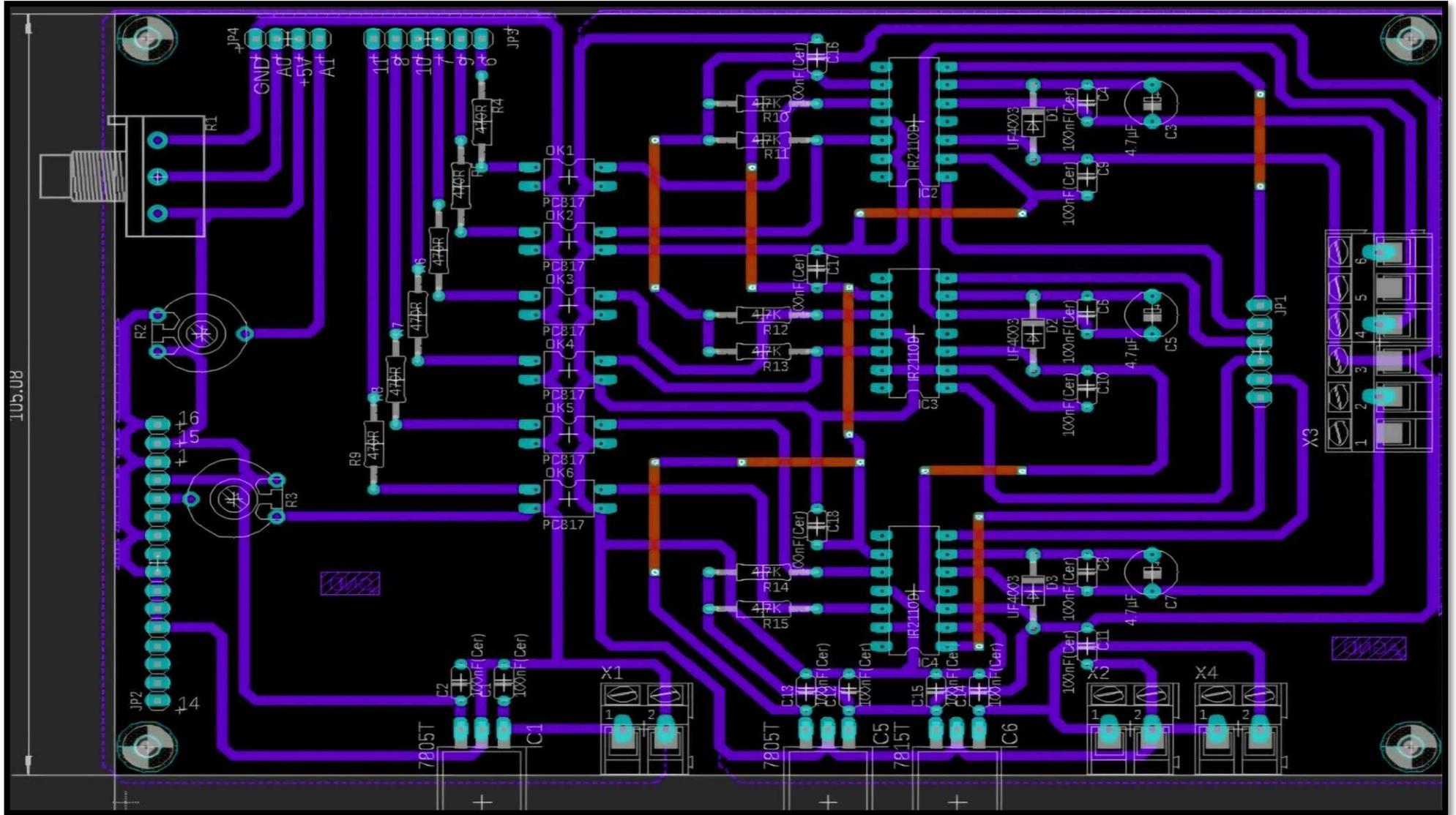


Figure IV.18 : Routage de la carte de commande

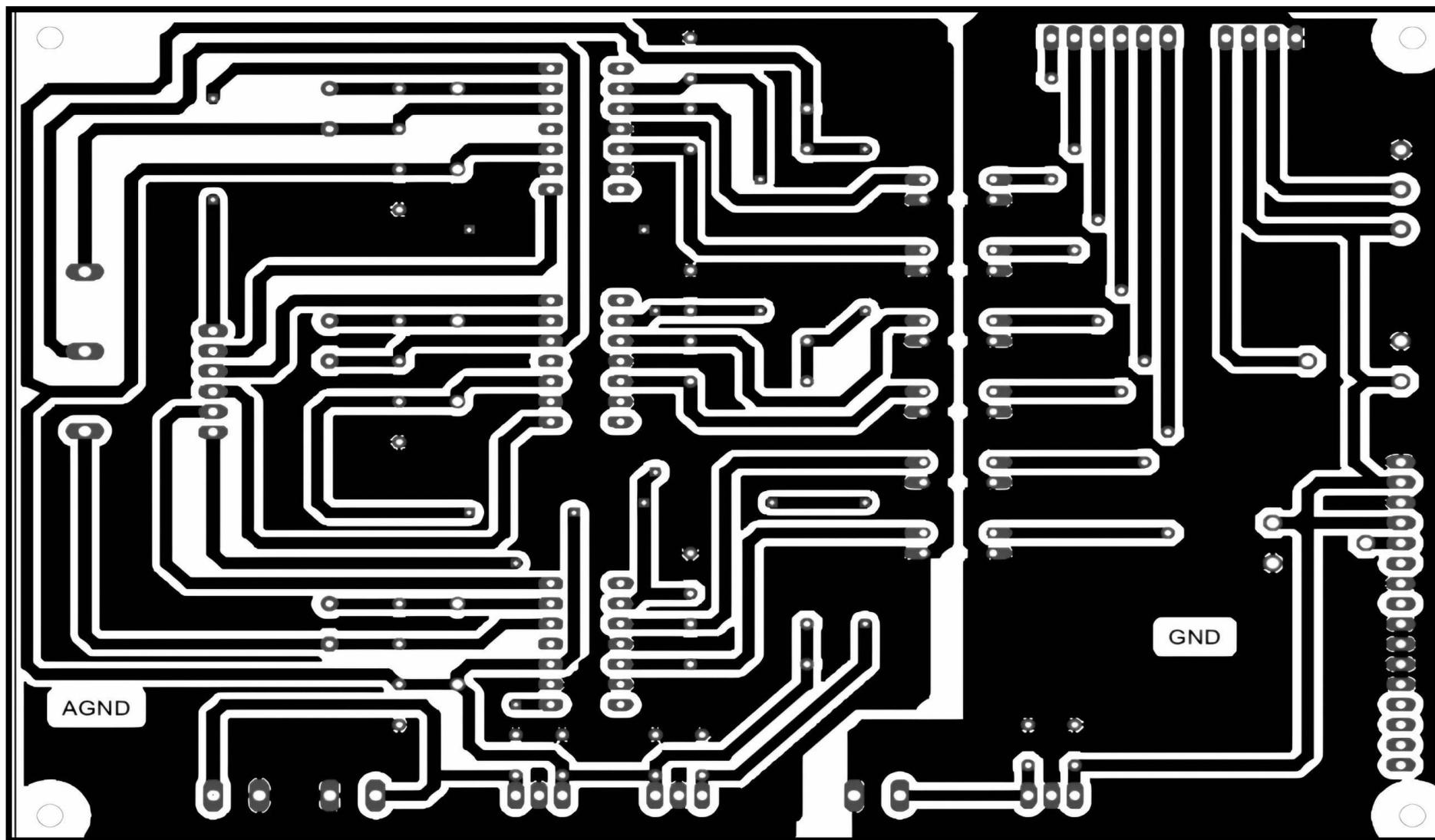


Figure IV.19 : Typon de la carte de commande

IV.4.1.3 Carte de puissance

Les transistors sont utilisés pour des courants, tensions et fréquences de commutation élevées, remplaçant les thyristors dans les variateurs de vitesse. Contrairement aux diodes et thyristors, le courant dans un transistor n'a pas besoin de passer par zéro, et il peut être commuté à tout moment en changeant la polarité de son électrode de commande.

Les nouvelles technologies ont augmenté la fréquence de commutation des transistors à plusieurs centaines de KHz. Cela réduit le bruit magnétique et permet d'obtenir une tension de sortie plus flexible et un courant moteur sinusoïdal si le schéma de commutation est correct. Cependant, une fréquence de commutation plus élevée augmente les pertes dans l'onduleur.

L'IGBT (Transistor Bipolaire à Grille Isolée) est utilisé car il combine les avantages des transistors bipolaires (hautes tensions et courants) et des MOSFET (commutations rapides et faible énergie de commande). Un IGBT de type NPN a un collecteur et un émetteur comme un transistor bipolaire, mais sa base est remplacée par une grille à haute impédance, comme dans un MOSFET. Il est composé d'un transistor bipolaire PNP de faible gain connecté à un MOSFET canal *N*, qui fournit le courant de base.

Pour notre application, on a choisi d'utiliser l'IGBT (IRG4PC40W)

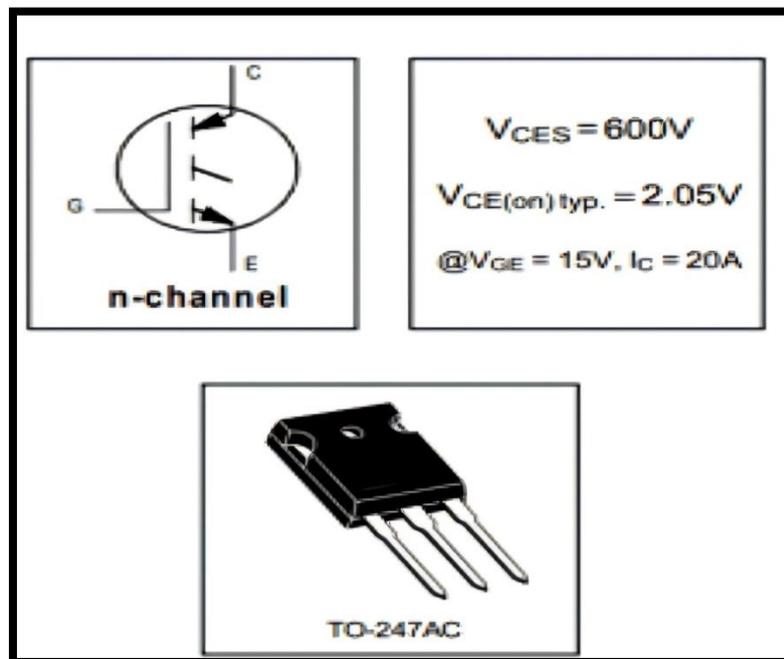


Figure IV.20 : IGBT IRG4PC40W

Le schéma électronique de la carte de puissance est réalisé par le logiciel (EAGLE) :

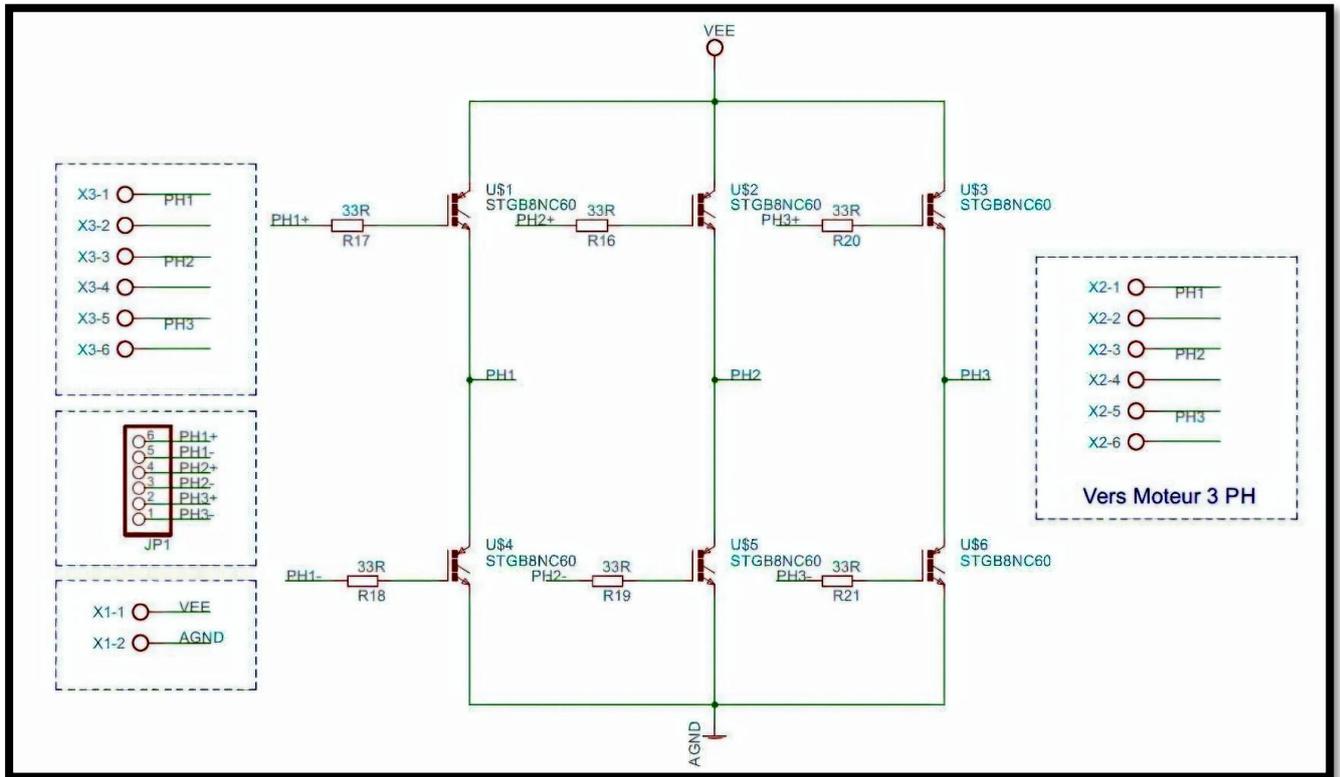


Figure IV.21 : Schéma électronique de la carte de puissance

IV.4.1.4 Routage de la carte de puissance

On a réalisé le routage de la carte de puissance sur un circuit imprimé simple face de $132 \times 98 \text{ mm}$. Le schéma de montage de cette carte de puissance, son routage et son typon sont donnés par les figures IV.22, IV.23 et IV.24 suivantes :

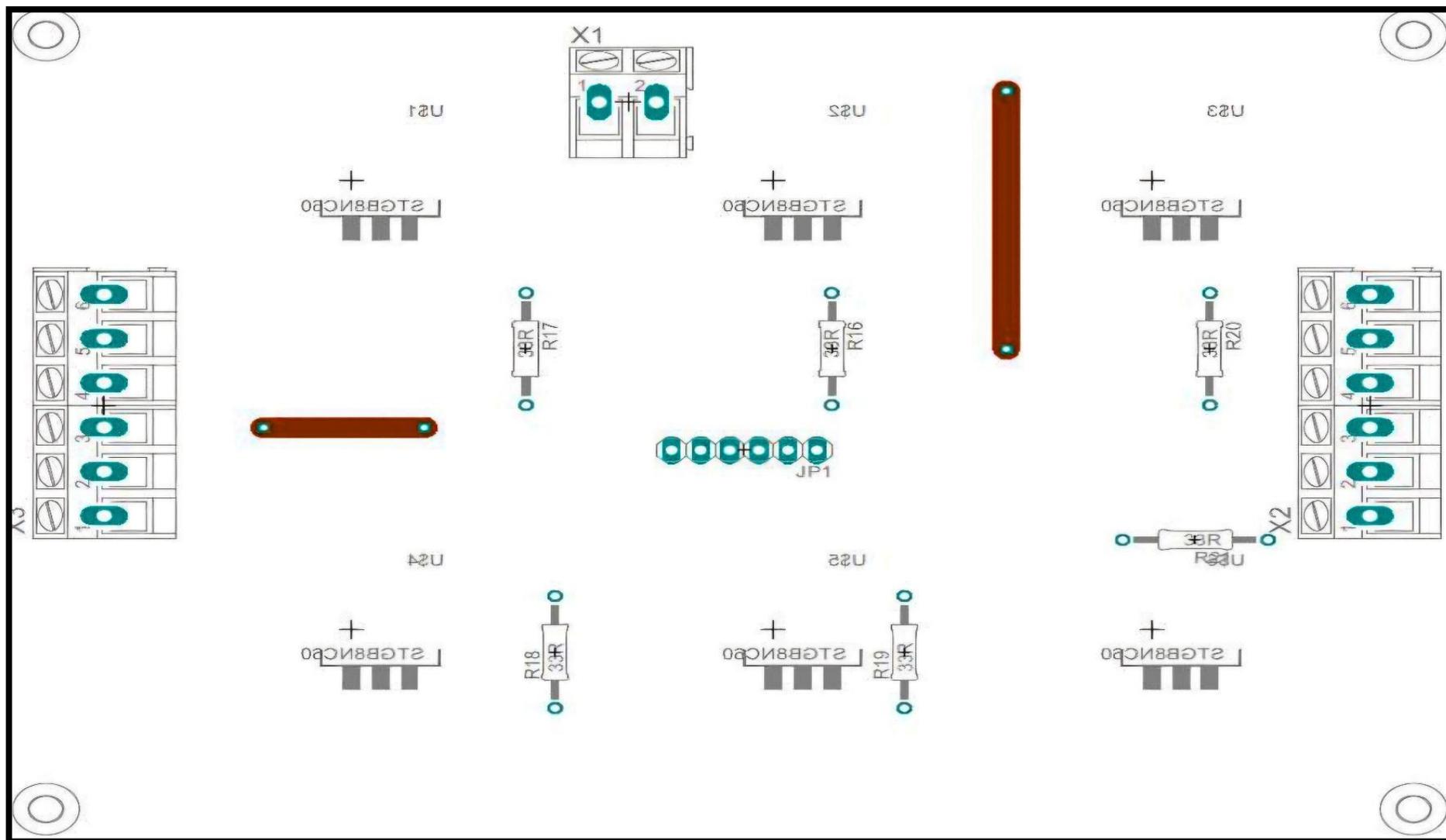


Figure IV.22 : Schéma du montage de la carte de puissance

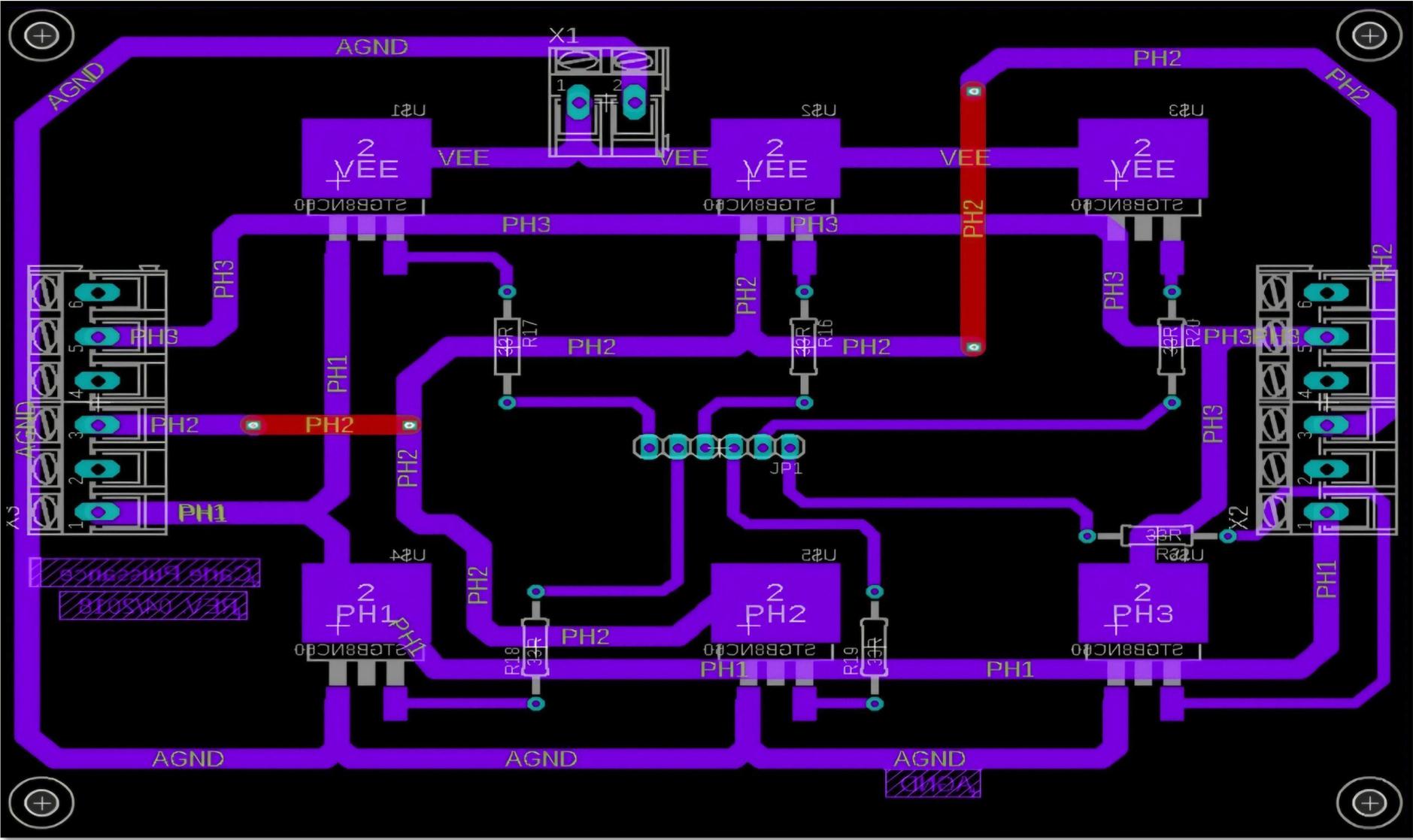


Figure IV.23 : Routage de la carte de puissance

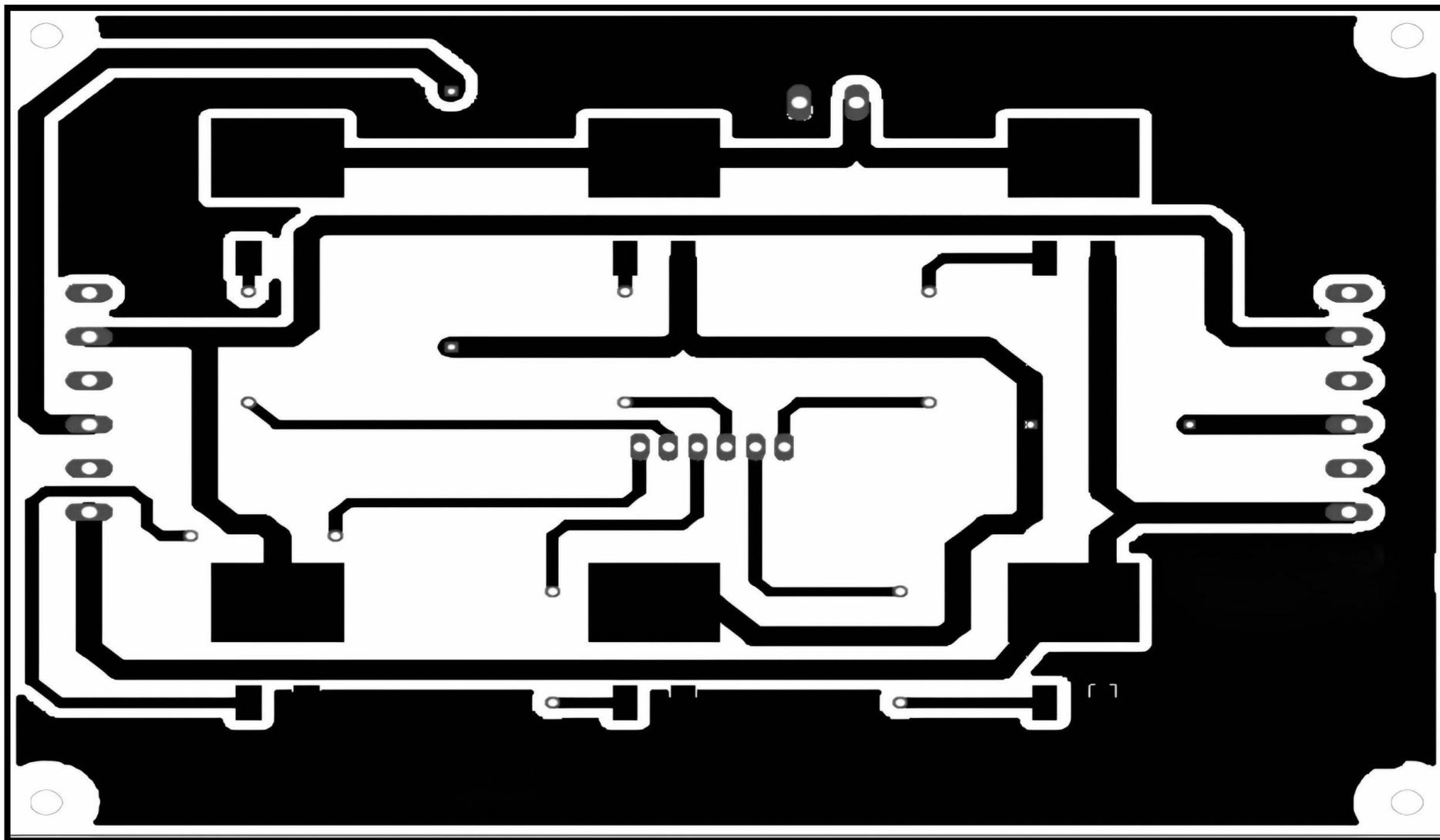


Figure IV.24 : Typon de la carte de puissance

IV.4.1.5 Routage de la carte d'affichage

On a réalisé le routage de la carte d'affichage sur un circuit imprimé simple face de $46.99 \times 45.72 \text{ mm}$. Pour les détails et le programme de PIC18F2550 voir annexe (3). Le schéma de montage de cette carte d'affichage, son routage et son typon sont donnés par les figures IV.25 et IV.26 suivantes :

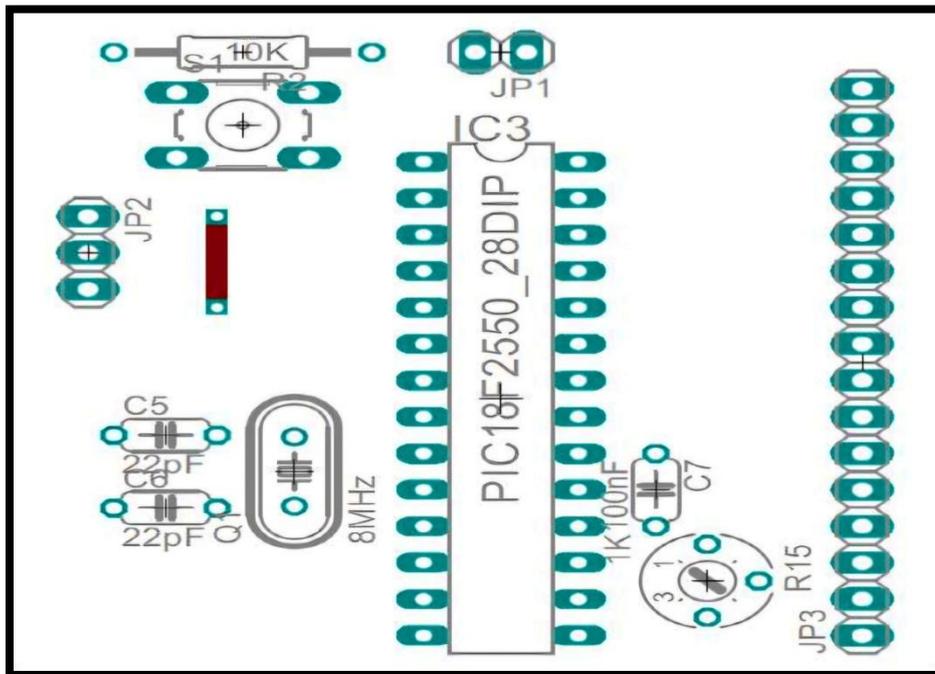


Figure IV.25 : Schéma du montage de la carte d'affichage

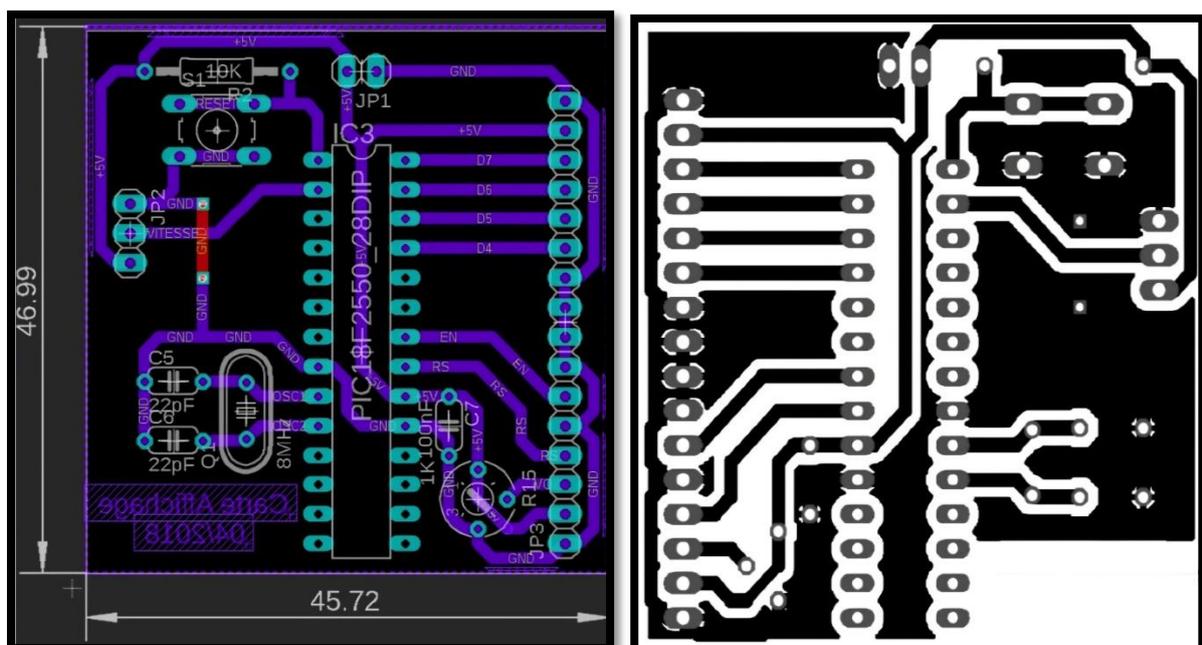


Figure IV.26 : Routage et typon de la carte d'affichage

IV.4.2 Réalisation pratique

IV.4.2.1 Carte de commande

Dans cette section, nous donnons les images de la réalisation de la carte de commande que nous avons effectué, les images correspondent à 'la face des composants' et à 'la face soudure'. Celles-ci sont données par la **Figure IV.27** et **Figure IV.28** respectivement.

a. Face des composants

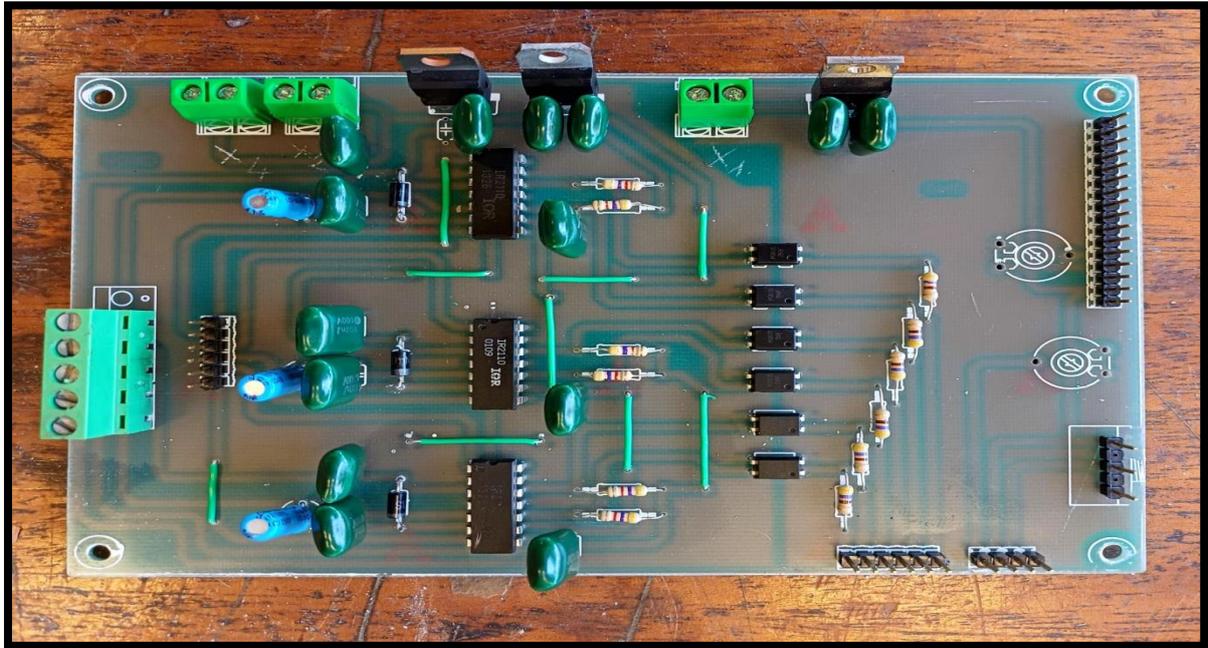


Figure IV.27 : Face des composants de la carte de commande

b. Face soudure

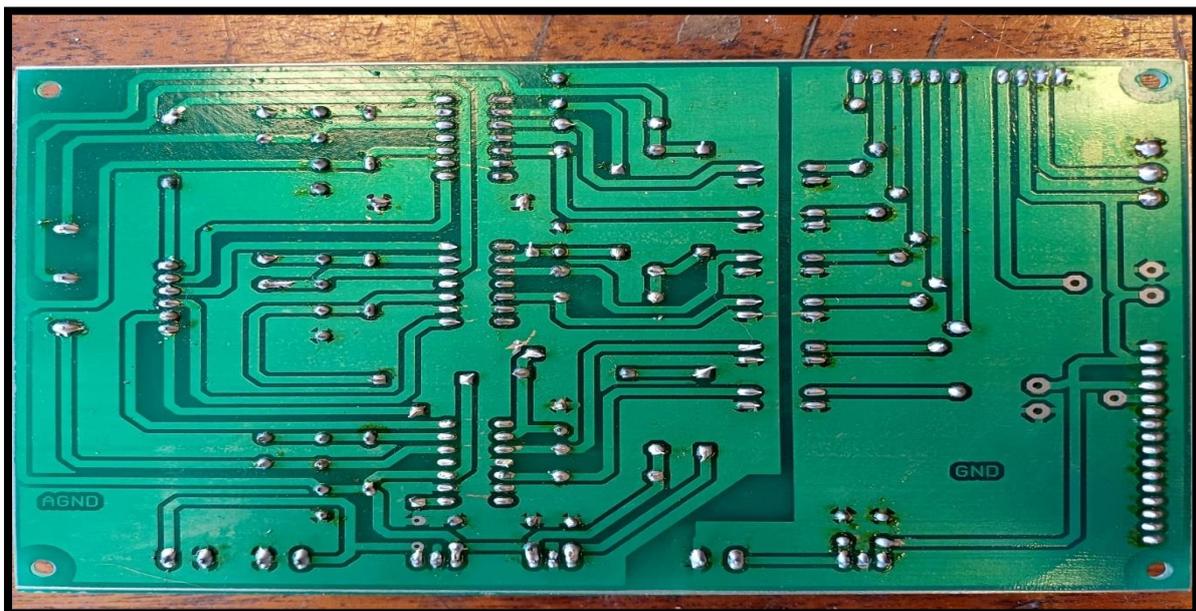


Figure IV.28 : Face soudure de la carte de commande

IV.4.2.2 Carte de puissance

Dans cette section, nous donnons les images de la réalisation de la carte de puissance que nous avons effectué, les images correspondent à 'la face des composants' et à 'la face soudure'. Celles-ci sont données par la **Figure IV.29** et **Figure IV.30** respectivement.

a. Face des composants

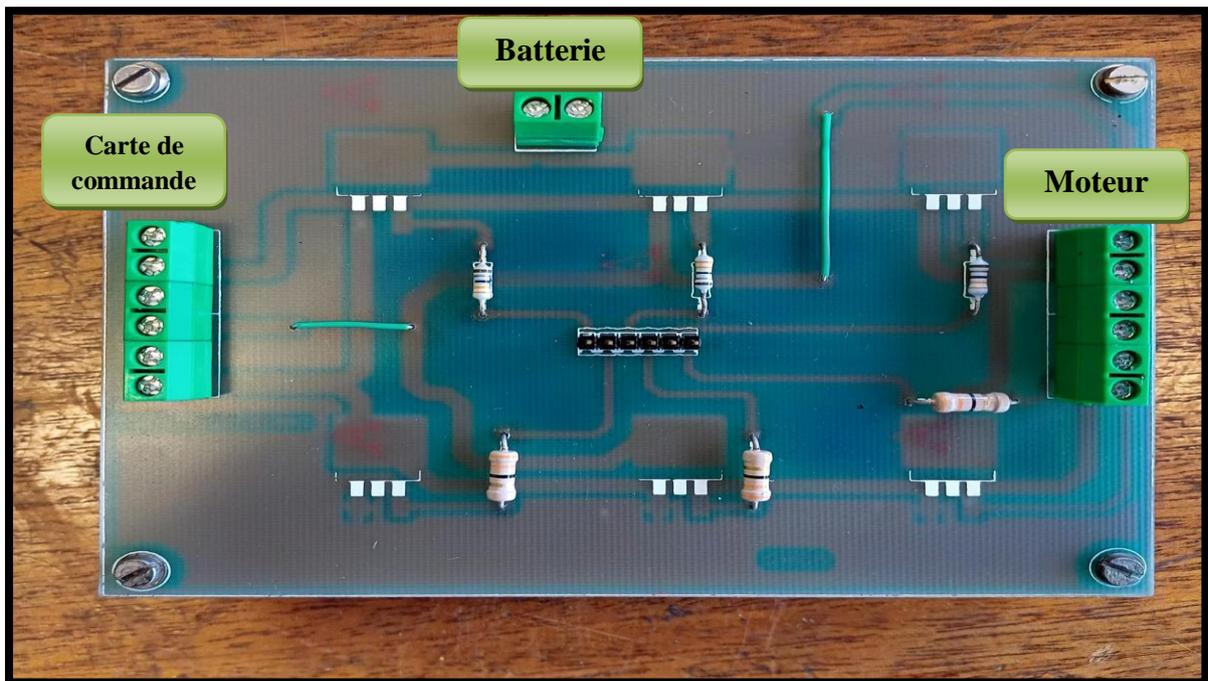


Figure IV.29 : Face des composants de la carte de puissance

b. Face soudure

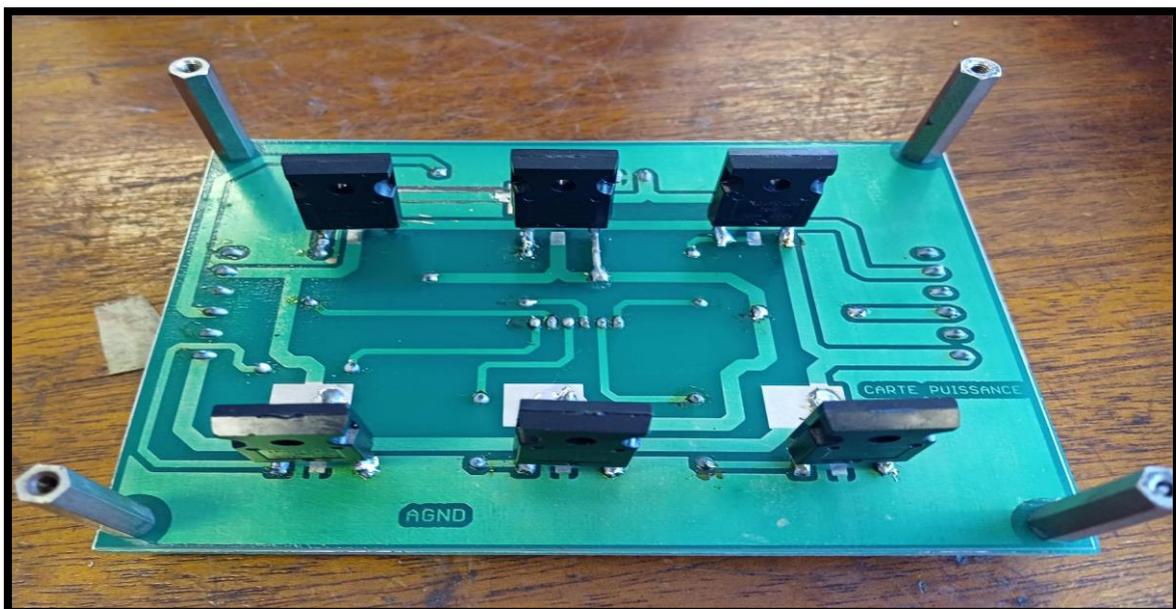


Figure IV.30 : Face soudure de la carte de puissance

IV.4.2.3 Carte d'affichage

Dans cette partie, nous donnons les figures correspondant aux images 'face des composants' et 'face soudure' de la réalisation de la carte d'affichage **Figure IV.31** et **Figure IV.32** respectivement.

a. Face des composants

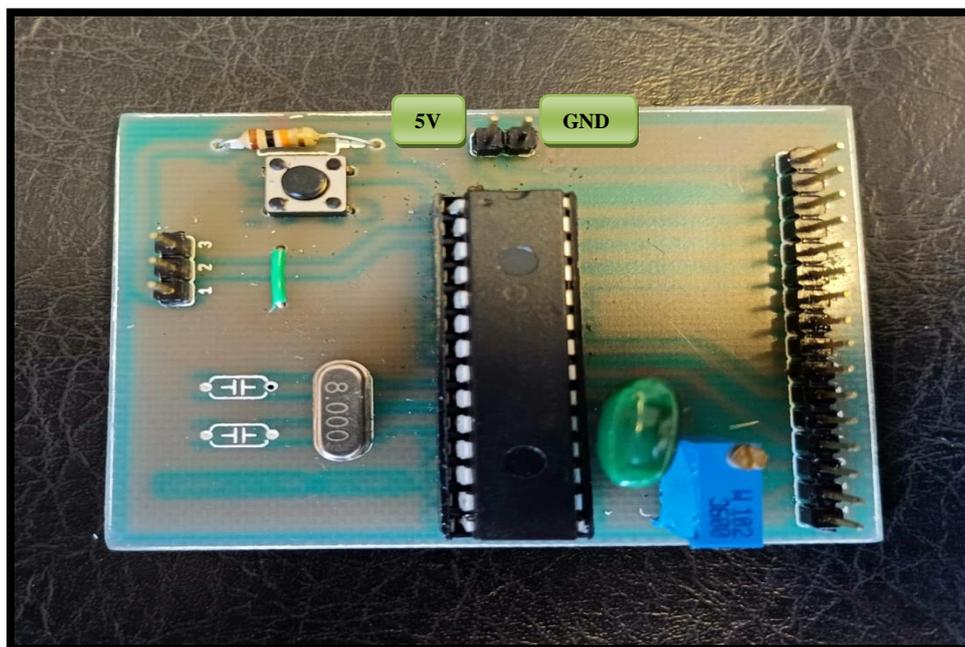


Figure IV.31 : Face des composants de la carte d'affichage

b. Face soudure

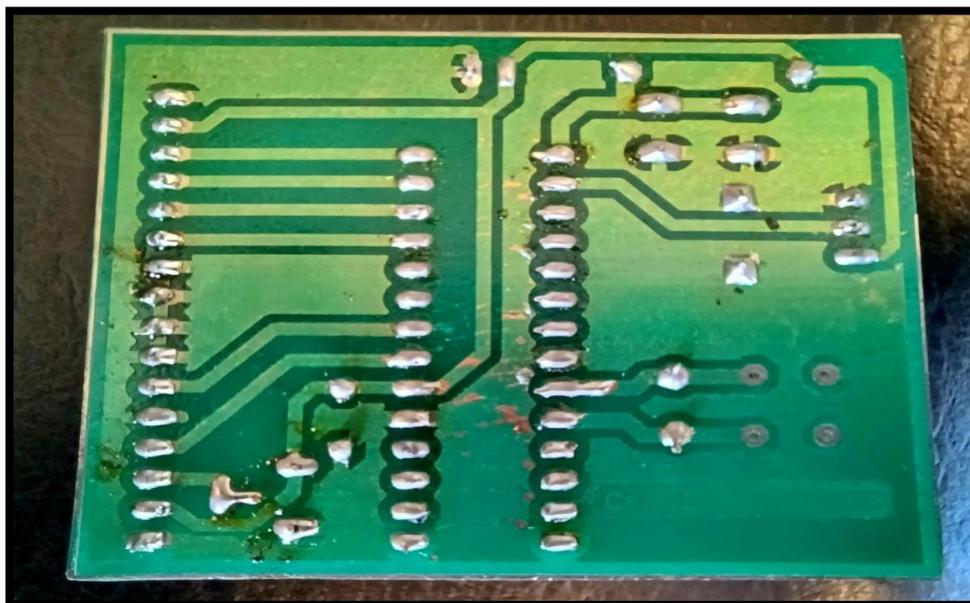


Figure IV.32 : Face soudure de la carte d'affichage

IV.4.2.4 Boitier du variateur

Dans cette section, nous présentons le plan de réalisation du boîtier ainsi que la fixation des différentes cartes, c-à-d la carte de commande munie de la carte Arduino, la carte de puissance et la carte d'affichage munie de son afficheur LCD.

IV.4.2.4.1 Plan de réalisation de boîtier

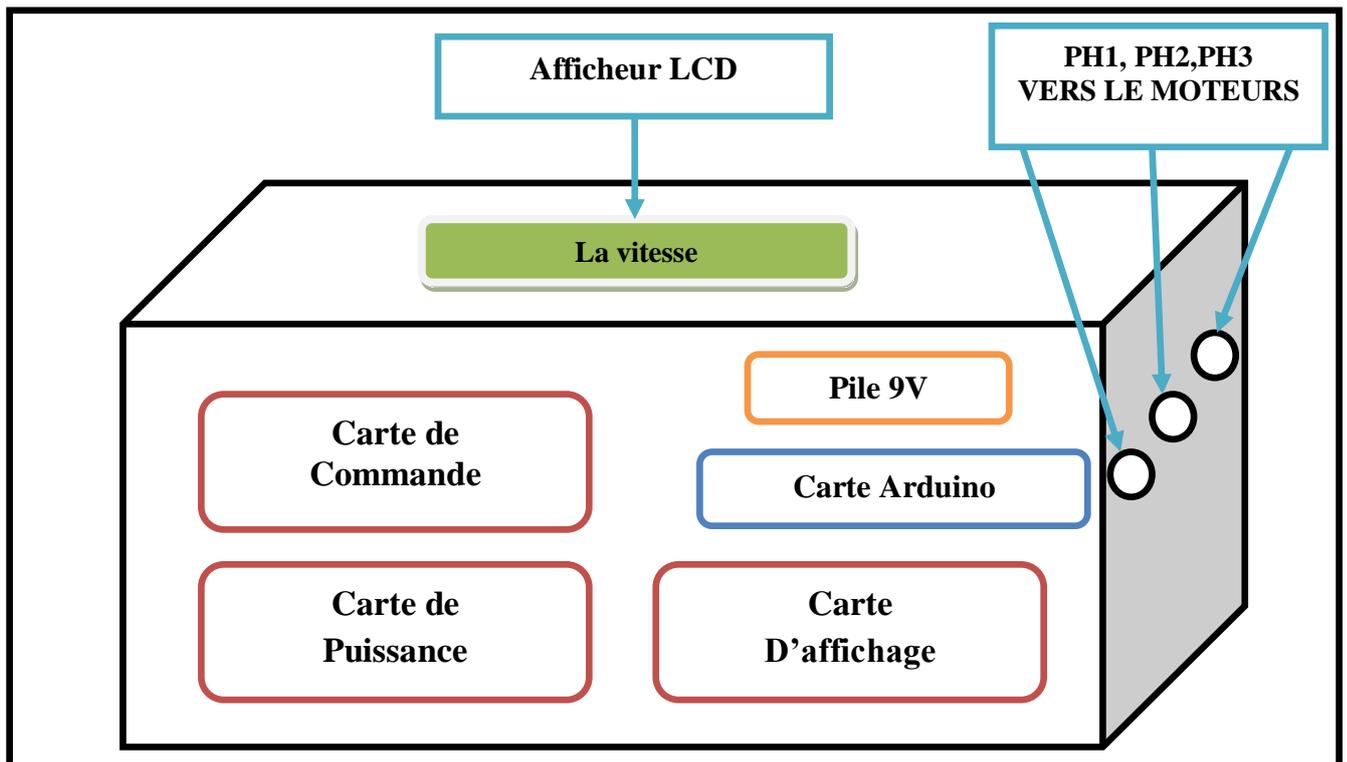


Figure IV.33 : Plan de réalisation du boîtier

IV.4.2.4.2 Fixation des cartes et câblages

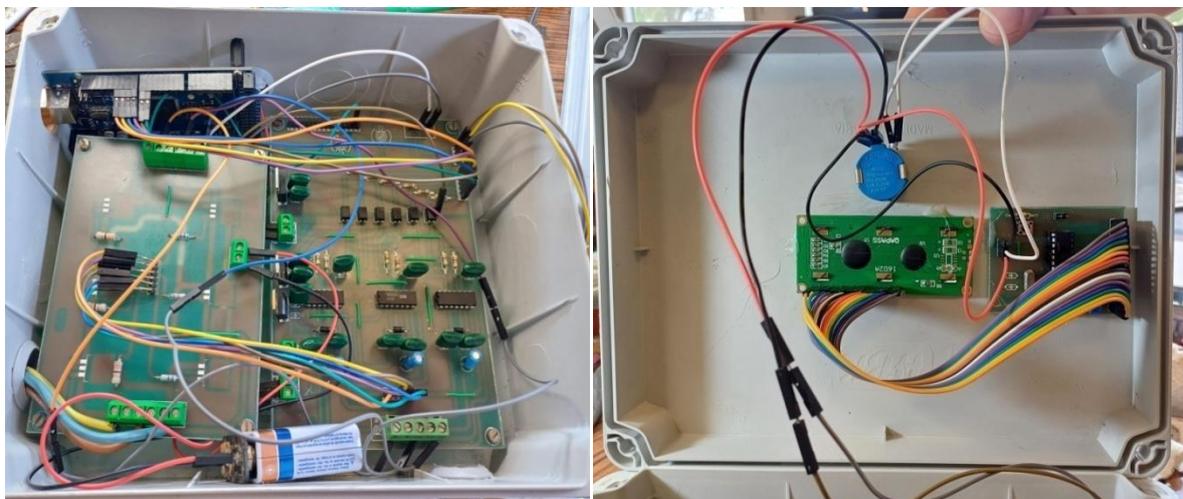


Figure IV.34 : Fixation des cartes et câblages

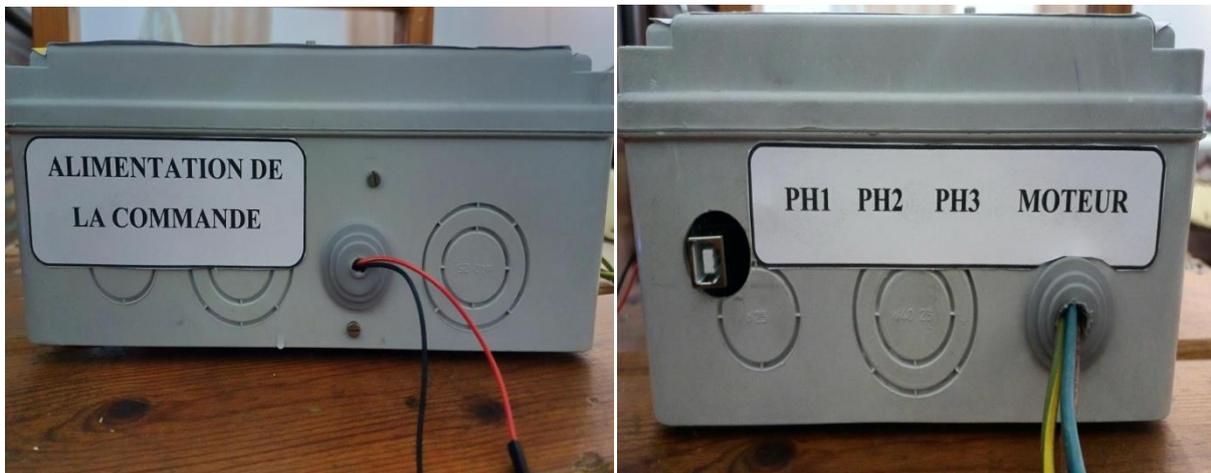


Figure IV.35 : Photo du variateur

IV.5 Etude économique

Nous présentons dans le tableau ci-dessous (Tableau IV.1) une étude économique des composants utiliser dans notre réalisation

Tableau IV.1 : Etude économique

Composants et référence	Quantité	Prix
ARDUINO MEGA 2560	1 unité	4500 DA
Wires jumpers male/male de 50 fils	1 unité	800 DA
Wires jumpers male/femelle de 50 fils	1 unité	800 DA

Pile 9V Varta	1 unité	80 DA
POTNETIOMETRE 1KOhm	1 unité	100 DA
POTNETIOMETRE linéaire 1Kohm	1 unité	150 DA
Resistance 470ohm	7 unités	70 DA
Régulateur 15V 7815CH	1 unité	120 DA
Régulateur 15V 7805CT, CH	2 unités	120 DA
Condensateur céramique 100nf 50v	16 unités	700 DA
Bornier 2P × 5mm	14 unités	280 DA
Résistance 4.7Kohm	6 unités	60 DA
Résistance 33ohm	6 unités	60 DA
Résistance 1.0Kohm	10 unités	100 DA
IGBT IRG4PC40W	6 unités	6000 DA
boitier en plastique +accessoires	1 unité	800 DA
PC 817	6 unités	600 DA
IR2110	3 unités	750 DA
Condensateur 4.7uF	3 unités	90 DA
PIC18F2550	1 unité	1200 DA
Support 28 pattes	1 unité	50 DA
Bouton PCB	1 unité	20 DA
Barette connecteur heauser mal double	1 unité	80 DA
Quartz 8 MHz	1 unité	50 DA
LCD 2*16	1 unité	1000 DA
Carte commande	1 unité	2000 DA
Carte de puissance	1 unité	2000 DA
Carte d'affichage	1 unité	2000 DA
Formation réalisation des cartes	1 unité	11000 DA
Totale	*****	35580 DA

IV.6 Conclusion

Dans ce dernier chapitre, on a développé un variateur de vitesse basé sur un onduleur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) pour un moteur asynchrone triphasé, contrôlé par une carte Arduino. On a commencé notre étude par la simulation des circuits électriques développés sur PROTEUS. La réalisation pratique a été effectuée en deux parties : dans la première partie, nous avons programmé les circuits des cartes de commande, de puissance et d'affichage sur logiciel EAGLE, en effectuant leur carte de montage, de routage et de typon. Par la suite, en deuxième partie, on est passé à la réalisation pratique de ces différentes cartes.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Ce projet visait à résoudre un problème critique rencontré par la station thermique de CAP-DJINET avec la pompe alimentaire, élément clé du système de chaudière, qui souffrait de pannes fréquentes dues à son coupleur hydraulique. Ces pannes entraînaient des interruptions de production coûteuses et affectaient la fiabilité globale de l'installation. La solution mise en œuvre consistait à remplacer le coupleur hydraulique par un variateur de vitesse électrique, permettant de contrôler la vitesse du moteur en ajustant la fréquence de la tension d'alimentation.

Pour atteindre cet objectif, nous avons suivi une démarche structurée en quatre chapitres, décrits comme suit :

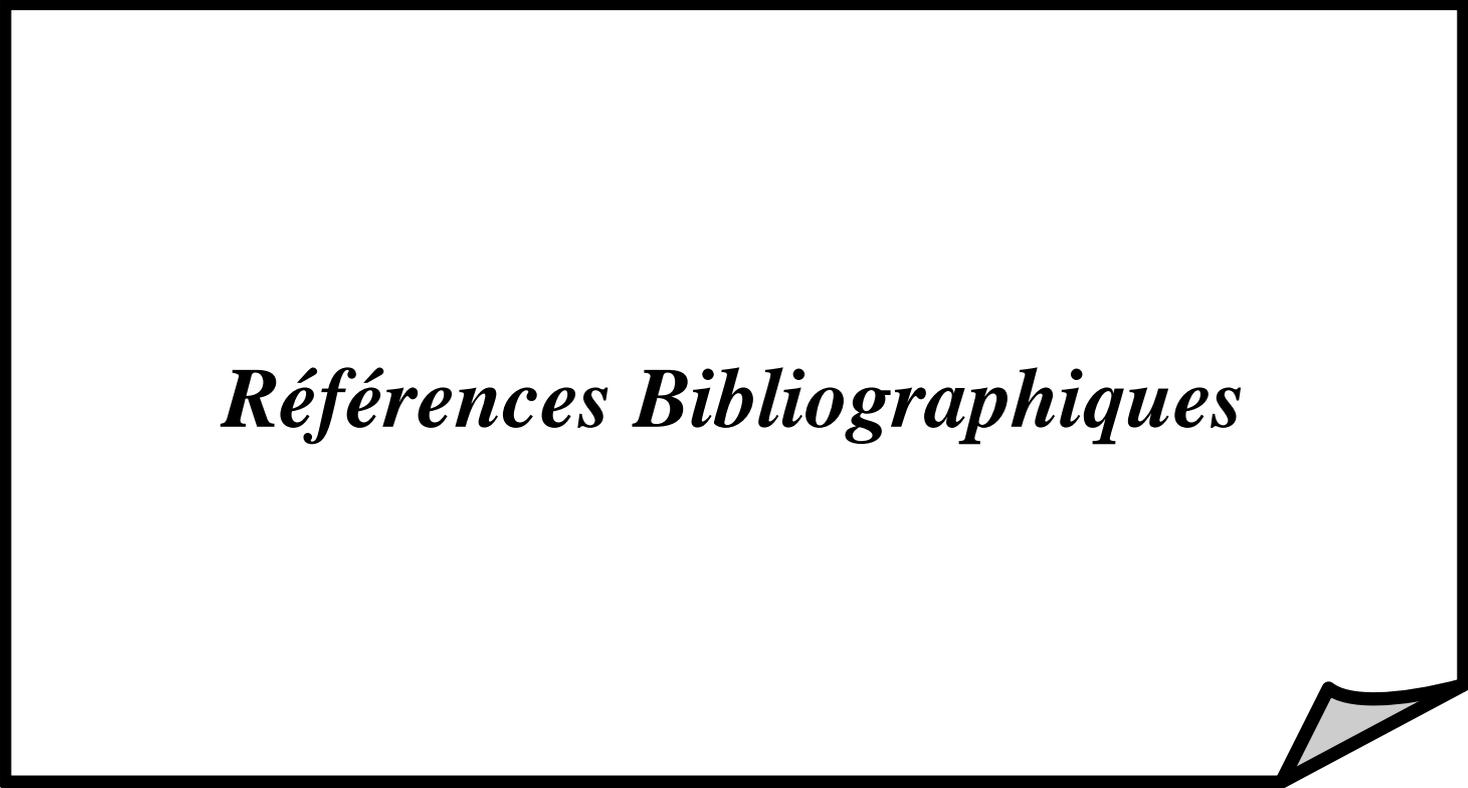
1. Présentation de l'entreprise SONELGAZ et de la centrale thermique à vapeur de CAP-DJINET : Contexte et problématique de la centrale, incluant son historique et son fonctionnement.
2. Étude générale de la pompe alimentaire et du variateur de vitesse : Analyse détaillée de la pompe alimentaire et critères de choix d'un moteur asynchrone triphasé et de son variateur de vitesse.
3. Simulation du variateur de vitesse : Utilisation du logiciel PSIM pour simuler et analyser les performances du variateur de vitesse avec différents types de commande.
4. Conception et réalisation d'un variateur de vitesse pour un moteur asynchrone triphasé : Conception, simulation sur PROTEUS et réalisation pratique du variateur de vitesse avec une carte Arduino.

Les résultats ont démontré que le variateur de vitesse électrique est une solution efficace pour remplacer le coupleur hydraulique. Il offre une meilleure fiabilité, réduit les coûts de maintenance et améliore l'efficacité du système.

En conclusion, ce projet résout non seulement le problème spécifique de la station thermique de CAP-DJINET, mais il propose aussi une approche applicable à d'autres installations industrielles confrontées à des défis similaires.

Conclusion générale

Les perspectives futures incluent l'intégration de systèmes de contrôle avancés et l'optimisation énergétique pour renforcer encore davantage la compétitivité et l'efficacité des processus industriels.



Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] Document interne : SONELGAZ. "Documentation interne de la centrale Thermique de Ras-Djinet."
- [2] D. Chabouni et S. Ghanine, "Étude de la centrale électrique de Cap-Djinet," Mémoire de licence professionnelle en génie électrique, option : électrotechnique, UMMTO, 2012.
- [3] Document interne : KWU, "Turbine à vapeur," Service de formation professionnelle, Chapitre no. 2.1, p. 6.
- [4] Document interne : KWU, "Alternateur et transformateur," Service de formation professionnelle, Chapitre no. 4.3, p. 17.
- [5] I. Boukhercha et K. Kouribeche, "Étude énergétique et économique de la centrale thermique de Ras-Djinet," Mémoire de master en génie mécanique, option : énergétique et moteurs, USTHB, 2014.
- [6] S. Chabouni et Z. Bournissa, "Adaptation d'une commande numérique au coupleur hydraulique de la centrale thermique CAP-Djinet," Mémoire de master en Électromécanique, UMBB, 2023.
- [7] S. M. Ch'beil, « simulation d'un variateur de vitesse pour un moteur asynchrone triphasé, » mémoire de master , université de BADJI MOKHTAR ANNABA,2019.
- [8] Site Web : https://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_asynchrone, consulté le : 02/04/2024
- [9] N. BOULEMSAMER « Etude et simulation d'un variateur de vitesse DC-DRIVE pour un Moteur à courant continu commandé par un API » mémoire master génie électrique, université de Bejaia,2012.
- [10] O. BELLACHE « Etude d'un variateur de vitesse électronique pour un moteur asynchrone »Mémoire de Master en Electrotechnique, université de Blida, 2017.
- [11] M.K.TIBERMACHINE « Commande vectorielle d'une machine asynchrone » mémoire master Électromécanique, Université Mohamed Khider, Biskra 2019.
- [12] Site Web : <https://energieplus-lesite.be/techniques/ascenseurs7/variableurs-de-vitesse/>, consulté le : 11/05/2024
- [13] A. BOUCHAHMA « Etude et réalisation d'un variateur de vitesse d'un Moteur Asynchrone Monophasé », Mémoire Master Électrotechnique, Université Djilali Bounaama, KHEMIS MILIANA, 2018.
- [14] N. Khenfer, « Machine asynchrone : ses modèles, son identification et sa commande »,Thèse de Doctorat, I.N.P de Lorraine (France), Octobre 1995.
- [15] Document intitulé : «variableurs de vitesse», source : www.altivar.be, consulté le : 12/05/2024

ANNEXE

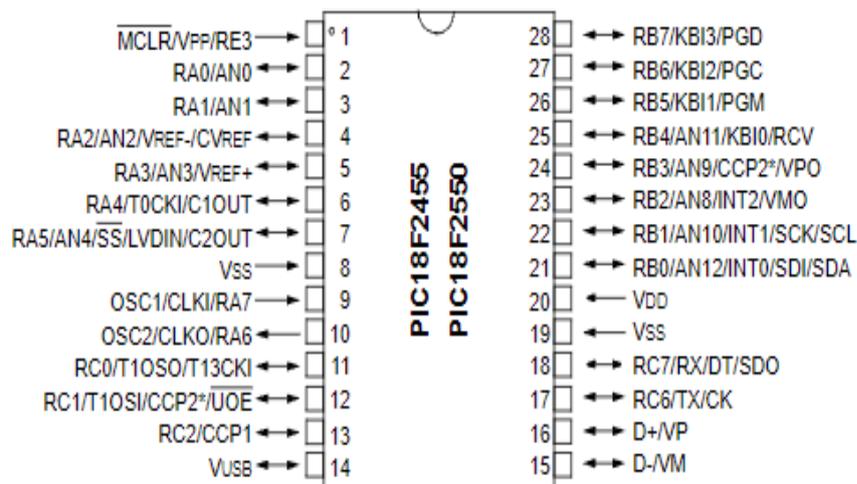
ANNEXE 1 : Datasheet des composants

IGBT IRG4PC40W

	Parameter	Max.	Units
V_{CES}	Collector-to-Emitter Breakdown Voltage	600	V
$I_C @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Continuous Collector Current	40	A
$I_C @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Continuous Collector Current	20	
I_{CM}	Pulsed Collector Current ①	160	
I_{LM}	Clamped Inductive Load Current ②	160	
V_{GE}	Gate-to-Emitter Voltage	± 20	V
E_{ARV}	Reverse Voltage Avalanche Energy ③	160	mJ
$P_D @ T_C = 25^\circ\text{C}$	Maximum Power Dissipation	160	W
$P_D @ T_C = 100^\circ\text{C}$	Maximum Power Dissipation	65	
T_J T_{STG}	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to + 150	°C
	Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (0.063 in. (1.6mm) from case)	
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw.	10 lbf·in (1.1N·m)	

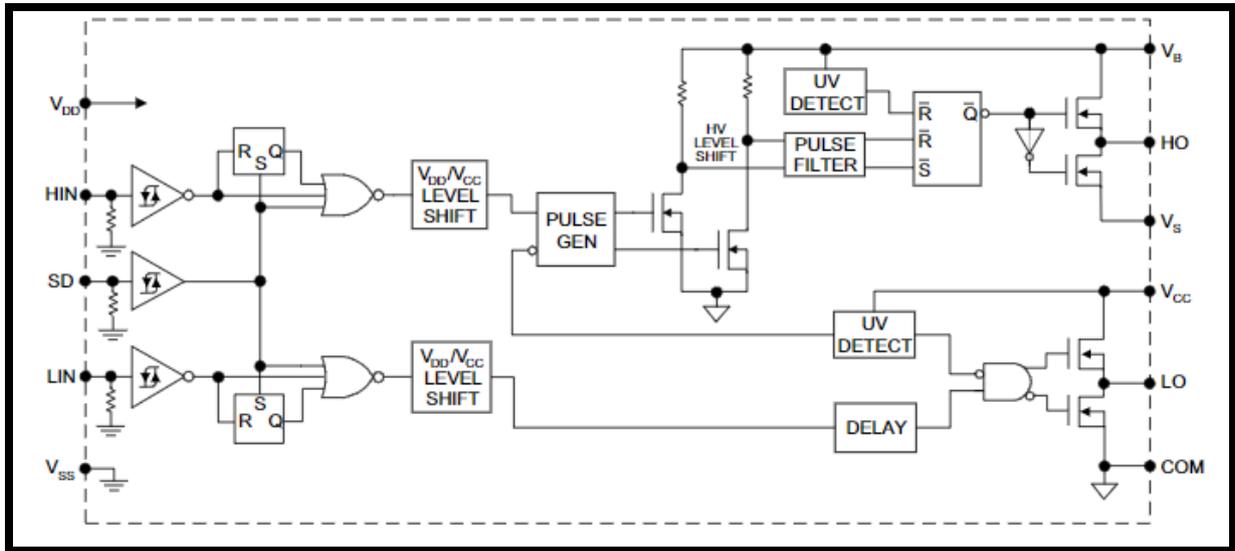
PIC18F2550 : Pin diagramme

28-Pin SDIP, SOIC



IR2110

Diagramme fonctionnel :



Montage d'application :

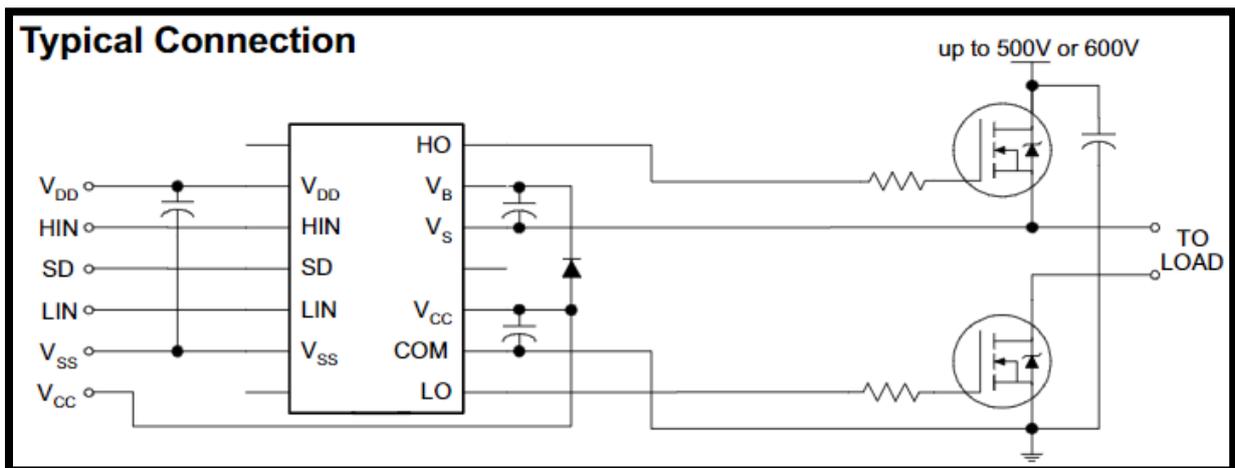
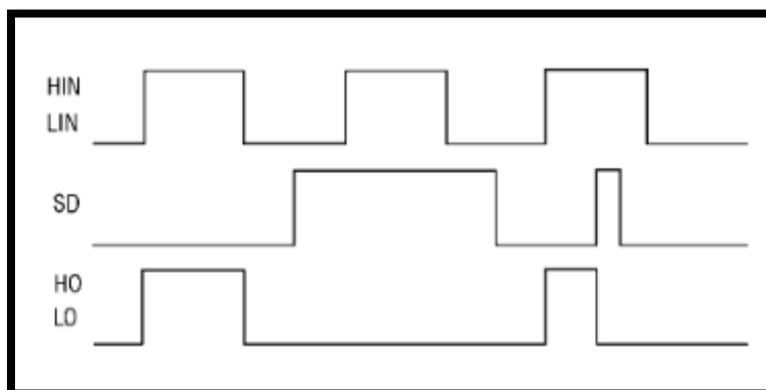


Diagramme HIN et LIN :



ANNEXE 2 : Programme de la carte ARDUINO

```
#define VT1 6
#define VT2 7
#define VT3 8
#define VT4 9
#define VT5 10
#define VT6 11
#define RELAY 2
#define SET_FREQ A0
#define SET_K_ZAP A1
#define MIN_FREQ 1575 // ~100 Hz
#define MAX_FREQ 12150 // ~15 Hz
int sw_time = 60;
int K_zap = 130;
int repeat_count = 200;
int i;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  pinMode(VT1, OUTPUT);
  pinMode(VT2, OUTPUT);
  pinMode(VT3, OUTPUT);
  pinMode(VT4, OUTPUT);
  pinMode(VT5, OUTPUT);
  pinMode(VT6, OUTPUT);
  pinMode(RELAY, OUTPUT);
  digitalWrite(RELAY, LOW);
  // Configuration de la fréquence PWM pour les quatre timers
  TCCR1B = TCCR1B & 0b11111000 | 0x02;
  TCCR2B = TCCR1B;
  TCCR3B = TCCR1B;
  TCCR4B = TCCR1B;
}
void loop() {
  sw_time = map(analogRead(SET_FREQ), 0, 1023, 1, 100);
  repeat_count = map(sw_time, 1, 100, 400, 100);
  K_zap = map(analogRead(SET_K_ZAP), 0, 1023, 255, 1);

  if (K_zap > 220) {
    // Arrêt du système si le coefficient de remplissage est trop élevé
    // Tous les transistors sont désactivés
    for (int pin = VT1; pin <= VT6; pin++) {
      digitalWrite(pin, HIGH);
    }
  }
}
```

```
delayMicroseconds(sw_time);
  } else {
    // Génération du signal PWM
    for (i = 0; i < repeat_count; i++) {
      pwm_loop_fwd_a2();
      if (i % 10 == 0) {
// Réajuster la fréquence et le coefficient de remplissage toutes les 10 itérations
sw_time = map(analogRead(SET_FREQ), 0, 1023, MIN_FREQ, MAX_FREQ);
K_zap = map(analogRead(SET_K_ZAP), 0, 1023, 255, 1);
      }
    }
  }
}

void pwm_loop_fwd_a2() {
analogWrite(VT1, K_zap);
analogWrite(VT3, K_zap);
analogWrite(VT5, K_zap);
delayMicroseconds(sw_time);

analogWrite(VT1, 255);
analogWrite(VT5, 255);
analogWrite(VT6, K_zap);
delayMicroseconds(sw_time);

analogWrite(VT1, 255);
analogWrite(VT2, K_zap);
analogWrite(VT6, K_zap);
delayMicroseconds(sw_time);

analogWrite(VT4, K_zap);
analogWrite(VT2, K_zap);
analogWrite(VT6, K_zap);
delayMicroseconds(sw_time);

analogWrite(VT4, K_zap);
analogWrite(VT2, K_zap);
analogWrite(VT3, K_zap);
delayMicroseconds(sw_time);

analogWrite(VT4, K_zap);
analogWrite(VT5, K_zap);
analogWrite(VT3, K_zap);
delayMicroseconds(sw_time);
}
```

ANNEXE 3 : Programme de PIC18F2550

```
// Projet : Variateur de vitesse avec affichage sur LCD
//*****
// LCD module connections
sbit LCD_RS at RB0_bit;
sbit LCD_EN at RB1_bit;
sbit LCD_D4 at RB4_bit;
sbit LCD_D5 at RB5_bit;
sbit LCD_D6 at RB6_bit;
sbit LCD_D7 at RB7_bit;
sbit LCD_RS_Direction at TRISB0_bit;
sbit LCD_EN_Direction at TRISB1_bit;
sbit LCD_D4_Direction at TRISB4_bit;
sbit LCD_D5_Direction at TRISB5_bit;
sbit LCD_D6_Direction at TRISB6_bit;
sbit LCD_D7_Direction at TRISB7_bit;
// End LCD module connections
float Vitesse = 0.0 ;
char TRMN[6] ;
float Vitesse_MAX = 1500.0;
void main()
{
  ADCON1=0b00001011 ; // AN0...AN3 analogique
  TRISA=0xFF;
  TRISB=0x00;
  Lcd_Init(); // Initialize LCD
  Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR); // Clear display
  Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF); // Cursor off
  ADC_Init();
  //ADCON1=0b00001110 ; // AN0 uniquement analogique
  LCD_Out(1,1,"PFE 2023-2024");
  LCD_Out(2,1,"VAR DE VITESSE");
  Delay_ms(1000);
  Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR);
  while (1)
  {
    // Mesure vitesse
    Vitesse = ADC_Read(0);
    Vitesse = ((float)Vitesse )*(Vitesse_MAX/1024) ;
    inttostr(Vitesse,TRMN);
    //Affichage bruit
    LCD_Out(1,1,"Vitesse:");
```

```
LCD_Out(2,1,Ltrim(TRMN));  
LCD_Out(2,10,"TR/MN");  
Delay_ms(2000);  
Lcd_Cmd(_LCD_CLEAR); // Clear display  
Lcd_Cmd(_LCD_CURSOR_OFF); // Cursor off  
}  
}
```

Résumé

Le présent mémoire se concentre sur l'analyse et la mise en œuvre d'un variateur de vitesse destiné à remplacer le coupleur hydraulique défectueux de la pompe alimentaire dans la station thermique de CAP-DJINET. Ce travail commence par une présentation détaillée de l'entreprise SONELGAZ et de son installation CAP-DJINET, suivie d'une étude approfondie de la pompe alimentaire et des critères de sélection du moteur asynchrone triphasé et de son variateur de vitesse. Ensuite, une simulation comparative entre deux commandes qui sont : la pleine onde et la modulation de largeur d'impulsion (MLI) est effectuée, dans le but d'évaluer les performances du variateur dans les deux situations. Nous nous sommes penchés sur la commande MLI qui s'avère la plus performante et plus facile à mettre en œuvre. Enfin, le mémoire se termine par la conception et la mise en œuvre pratique du variateur, avec une réflexion sur les améliorations futures possibles pour optimiser davantage l'efficacité énergétique et le contrôle de ce système crucial pour l'usine.

Mots-clés : Commande pleine onde, Conception, Modulation de largeur d'impulsion (MLI), Moteur asynchrone triphasé, Station thermique de CAP-DJINET, Variateur de vitesse.

Abstract

This thesis focuses on the analysis and implementation of a speed controller designed to replace the faulty hydraulic coupling of the feed pump in the CAP-DJINET thermal power station. The work begins with a detailed presentation of the company SONELGAZ and its CAP-DJINET installation, followed by an in-depth study of the feed pump and the criteria for selecting the three-phase asynchronous motor and its speed controller. Next, a comparative simulation between two control methods, which are: full-wave and pulse-width modulation (PWM), is conducted to evaluate the performance of the speed controller in both situations. We focused on the PWM control, which proved to be the most efficient and easiest to implement. Finally, the thesis concludes with the design and practical implementation of the speed controller, along with reflections on possible future improvements to further optimize the energy efficiency and control of this critical system for the plant.

Key words : Full-wave control, Design, Pulse-width modulation (PWM), Three-phase asynchronous motor, CAP-DJINET thermal power station, Speed controller.

ملخص

يركز هذا البحث على تحليل وتنفيذ منظم السرعة المصمم لاستبدال القارئة الهيدروليكية المعطوبة لمضخة التغذية في محطة توليد الطاقة الحرارية في كاب-جنات. يبدأ العمل بتقديم مفصل لشركة سونلغاز وتركيبها في كاب-جنات، متبوعاً بدراسة متعمقة لمضخة التغذية ومعايير اختيار المحرك غير المتزامن ثلاثي الأطوار ومنظم السرعة الخاص به. بعد ذلك، يتم إجراء محاكاة مقارنة بين طريقتين للتحكم، وهما: الموجة الكاملة وتعديل عرض النبضة (PWM)، لتقييم أداء منظم السرعة في كلتا الحالتين. ركزنا على التحكم بـ PWM، الذي أثبت أنه الأكثر كفاءة والأسهل في التنفيذ. وأخيراً، ينتهي البحث بتصميم وتنفيذ عملي لمنظم السرعة، مع تأملات حول التحسينات الممكنة في المستقبل لزيادة كفاءة الطاقة والتحكم في هذا النظام الحيوي للمصنع.

الكلمات المفتاحية : التحكم بالموجة الكاملة، التصميم، تعديل عرض النبضة (PWM)، المحرك غير المتزامن ثلاثي الأطوار، محطة توليد الطاقة الحرارية في كاب-جنات، منظم السرعة.