

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE**

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique**

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان -

**Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –
Faculté de TECHNOLOGIE**



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Electronique

Spécialité : Instrumentation

Par : BEKKAL Mohammed Soufyane
MAROUF Youssouf

Sujet

**Conception d'un variateur de fréquence pour moteur
triphasé à base d'Atmega 328**

Soutenu en juin 2022 devant le jury composé de :

BENADDA Belkacem	PROF	Université de Tlemcen	Président
MELIANI Sidi Mohammed	PROF	Université de Tlemcen	Examineur
NEMMICHE Ahmed	MCB	Université de Tlemcen	Encadreur
BELARBI Boumedienne	MCB	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Remerciements

*Au nom d'**Allah** le tout miséricordieux, le très miséricordieux*

*On tient tout d'abord à remercier **ALLAH** le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.*

En second lieu, nous tenons à remercier nos parents pour leurs soutiens moraux et leur aide, ainsi que toute personne ayant aidé de près ou de loin à l'achèvement de notre projet de fin d'études.

*On tient aussi à exprimer nos profondes gratitudeux aux nos encadreurs **Mr. A.Nemmiche et B.Belarbi** pour leur précieux conseils et leur aides durant toute la période du travail.*

*Nous tenons également à remercier les membres du jury à savoir **Mr BENADDA Belkacem et Mr MELIANI Sidi Mohammed**, qui ont bien voulu accepter de porter leur jugement sur ce modeste travail que nous souhaitons à la mesure de leur satisfaction.*

*Nos remerciements s'adressent également à tous nos professeurs de ces cinq belles années, spécialement **Mr. BENAHMED Naserddine** pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.*

N'oublions pas nos amis de notre belle promotion pour les bons moments passés ensemble au sein de notre département

*Et pour finir nous remercions encore et encore **Allah**, qui nous a permis de réaliser notre rêve, d'être des Ingénieurs en électronique !*

Dédicaces

Avec une profonde gratitude et sincères mots, que je dédie ce modeste travail :

A ma très chère mère **ZHOR**, ma source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études, aucune dédicace ne saurait être aussi éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance. Que Dieu le tout puissant t'accorde son paradis éternel (amen).

A mon cher papa **SALAH** pour son soutien moral, et pour tous les sentiments d'affection et d'amour qui représentent pour moi le pilier de tous mes efforts. Qui a mis à ma disposition tous les moyens nécessaires pour que je réussisse dans mes études. Que Dieu le tout puissant t'accorde son paradis éternel (amen).

A mon frère **MOHAMED** qui n'a cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et à Mes chères sœurs **HANANE** et **MOUNA** présentes dans tous mes moments d'examen par ses soutiens moraux. Je vous souhaite un avenir plein de joie, de réussite et de sérénité.

A la mémoire de mes grands-pères, à mes grands-mères, mes tantes et mes oncles et à la mémoire de mon oncle **HACHEMI**, mes cousins qui sont toujours là pour moi, A toute la famille **MAROUF** et **AZZI**

A mes chers amis **Abderazzak, Abdelhak, Nassim, Nacer, ouassini, Reda, Mohammed, Amine, Abdenour** et mon amie **Saliha**; Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection.

A mon cher binôme **SOUFYANE**, qui a eu la patience de me supporter durant ce mémoire, et qui m'a soutenu et encouragé pendant tous les moments difficiles vécus.

Je vous dédie ce travail et je vous souhaite en témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble, une vie pleine de santé et de bonheur.

Et à tous ceux que ma réussite leur tient à cœur.

YOUSOUF

Dédicaces

Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que : Je dédie ce modeste travail à :

A ma chère Mère **Hafida** : qui représente pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager de prier pour moi. Celle qui m'a entourée pour que rien n'entrave le déroulement de mes études .vous avez fait plus qu'une mère puisse faire pour ses enfants. Que Dieu vous protège et vous guérisse Maman.

A Mon très cher Père **BENSEFIA** : Aucune dédicace ne saurait exprimer l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation le long de ces années.

Puisse Dieu, le Très Haut, vous accorder santé, bonheur et longue vie.

Je tiens à remercier mes sœurs **Nesrine** et **Malak** ainsi que mon frère **Adlene** et toute ma grande famille.

Un merci tout particulier à celui qui a partagé avec moi les moments les plus beaux et les plus dures de cette année, A mon binôme **Youssef** et à toute sa famille.

À mes amis de toujours mes véritables frères: **Nacer Taleb, Wassini Bensalah, Hamouda Kadri, et Amine Mkadder.**

En souvenir de notre sincère amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.
À toutes les personnes qui ont participé a L'élaboration de ce travail... Merci.

A la fin, j'espère que ce mémoire sera utile pour mes confrères et consœurs.

SOUFYANE

Sommaire

Sommaire.....	1
Table des illustrations.....	4
Introduction générale.....	6
I. Chapitre I : GÉNÉRALITÉS SUR LA MACHINE ASYNCHRONE TRIPHASÉE	7
I.1 Introduction.....	8
I.2 Présentation générale de moteur asynchrone triphasé :.....	8
I.2.1 Constitution de moteur asynchrone triphasé.....	9
a Stator.....	9
b Rotor	9
I.2.2 Symbole de moteur triphasé à cage d'écureuil.....	10
I.2.3 Plaque signalétique de MAS.....	10
I.3 Mode de couplage.....	11
I.3.1 Couplage étoile.....	12
I.3.2 Couplage triangle.....	12
I.4 Rappel des notions de triphasé :	13
I.5 Principe de fonctionnement du moteur asynchrone :	14
I.5.1 Vitesse de synchronisme :	18
I.5.2 Glissement et vitesse de glissement :	18
I.6 Caractéristique du moteur asynchrone :	19
I.7 Le bobinage:	20
I.8 Caractéristiques de moteurs asynchrones à cage d'écureuil :.....	21
I.8.1 Moteur fonctionnant à vide :	21
I.8.2 Moteur fonctionnant à pleine charge:.....	21
I.9 La mesure de la puissance absorbée: [3]	22
a. Mesure de la puissance absorbée :.....	22

b.	La puissance réactive :.....	22
c.	La puissance apparente :.....	23
d.	Bilan des puissances :.....	23
e.	Rendement:.....	Erreur ! Signet non défini.
II.	Chapitre II : Les Variateurs de Vitesse.....	25
II.1	Introduction.	26
II.2	Principe de fonctionnement.	26
II.3	Les avantages et les inconvénients d'un variateur de vitesse.....	27
II.3.1	Les avantages d'un variateur de vitesse.....	27
II.3.2	Les inconvénients d'un variateur de vitesse.	28
III.	Chapitre III : Simulation.....	29
III.1	Introduction.	30
III.1	31
III.2	Schéma global	31
III.3	Composants utilisés	32
III.3.1	Définition et principe de l'IGBT. [5]	32
III.3.2	IR2101 driver.....	34
III.3.3	Alimentation continue. [6].....	34
III.3.4	Unité de traitement des données(ATMega328p). [7]	36
III.4.	Les TIMERS : [8]	38
III.4.1	Timers du microcontrôleur de l'ATmega328P.....	39
III .4.2	Organigrammes de fonctionnement :	40
a.	Initialisations générales :	40
b.	Interruption timer :	41
III.5	Résultats de simulation.....	42
a	Fréquence F=10 Hz :	42
b	Fréquence F=15 Hz :	43

c	Fréquence $F=20$ Hz :	44
d	Fréquence $F=30$ Hz :	45
e	Fréquence $F=50$ Hz :	46
f	Fréquence $F=80$ Hz :	47
g	Fréquence $F=100$ Hz :	48
III.6 Calculs théoriques.....		49
III.6.1 Calculs des impédances et courants:		49
III.6.2 Comparaison entre simulation et théorie :.....		49
III.7 prototype.....		50
III.7.1 circuit imprimé		50
III.7.2 avant routage.....		50
III.7.3 implantation des composants.....		51
III.7.4 vue 3D		51
Conclusion.....		52
Bibliographie		53
Résumé		54
ملخص.....		54
Summary.....		54

Table des illustrations

Figures.

Figure 1. Vue d'un moteur asynchrone triphasé.....	8
Figure 2. Le stator à cage d'écureuil	9
Figure 3. Le rotor à cage d'écureuil.....	10
Figure 4. Symbole de moteur asynchrone a cage d'écureuil	10
Figure 5. Plaque signalétique de MAS	11
Figure 6. Schéma d'un coupage étoile pour moteur asynchrone.....	12
Figure 7. Schéma d'un coupage triangle pour moteur asynchrone	13
Figure 8. Schéma d'un couplage simple pour moteur asynchrone.....	13
Figure 9. Schéma de principe d'un moteur asynchrone	15
Figure 10. Champ magnétique créé par un courant dans une bobine.....	15
Figure 11. Champ magnétique créé par un courant dans une bobine.....	16
Figure 12. Champ résultant créé par trois bobines traversées par un courant	16
Figure 13. Cage à écureuil du moteur asynchrone	17
Figure 14. Courants instantanés circulant dans les enroulements et position correspondante du champ magnétique.....	18
Figure 15. Caractéristique du moteur asynchrone	19
Figure 16. . Caractéristique du moteur asynchrone	21
Figure 17. Fonctionnement de moteur en charge	22
Figure 18. Bilan des puissances.....	23
Figure 19. Puissance et rendement	24
Figure 20. Principe de fonctionnement.....	26
Figure 21. Figure de vitesse de l'ascenseur	30
Figure 22. Schéma de simulation programme sur PROTEUS	31
Figure 23. Structure intérieure d'un MOSFET	32
Figure 24. Model d'un transistor IGBT	33
Figure 25. Détails du produit et son Packages.....	34
Figure 26. Redressement triphasé double alternance	35
Figure 27. Tension de sortie redressée triphasée double alternance.....	35
Figure 28. Le microcontrôleur ATMEGA328P.....	37
Figure 29. Schéma de microcontrôleur ATMEGA328P	37

Figure 30. Spectres du courant statoriques du moteur à la fréquence 10 Hz.....	42
Figure 31. Spectres du courant statoriques du moteur à la fréquence 15 Hz.....	43
Figure 32. Spectres du courant statoriques du moteur à la fréquence de 20 Hz.....	44
Figure 33. Spectres du courant statoriques du moteur à la fréquence de 30 Hz.....	45
Figure 34. Spectres du courant statoriques du moteur à la fréquence 50 Hz.....	46
Figure 35. Spectres du courant statoriques du moteur à la fréquence 80 Hz.....	47
Figure 36. Spectres du courant statoriques du moteur à la fréquence 100 Hz.....	48

Tableaux.

Tableau 1. Tableaufichestechniquesdel'ATMega-328p.	39
Tableau 2. Calculs des impédances et courants.....	49
Tableau 3. Calcul des résultats de simulation	49

Introduction générale

Le moteur asynchrone est un moteur électrique durable, simple à utiliser, doté d'un couple de démarrage élevé et nécessitant peu ou pas d'entretien. Grâce à ces avantages, il contrôle aujourd'hui plus de 80 % du parc de machines électriques.

Du fait que le moteur asynchrone est, par définition, un moteur mono vitesse, certaines applications nécessitant une variation de vitesse ont longtemps été écartées, malgré la recherche de solutions technologiques parfois inédites.

Cela était vrai jusqu'à l'avènement des convertisseurs de puissance statiques. En effet, de nos jours, grâce aux progrès de l'électronique de puissance (nouveaux transistors comme l'IGBT) et de l'électronique de contrôle (commandes numériques via un microprocesseur), ce moteur peut faire varier sa vitesse.

Depuis l'avènement de la technologie des semi-conducteurs, la variation électronique de vitesse des moteurs électriques a triomphé des systèmes plus anciens comme les groupes Ward Léonard.

Dans le premier chapitre, nous avons étudié les fondamentaux des machines asynchrones et leurs principes de fonctionnement, avant de présenter la structure de la machine. Ensuite, nous vous montrerons le diagnostic de la machine asynchrone. Plus la plaque MAS, résultant du mode couplage, et un bref rappel des notions de triphasées.

Dans le deuxième chapitre, nous avons d'abord abordé les principes généraux du contrôle de vitesse, puis nous avons évoqué les avantages et les inconvénients de cet équipement. En plus de l'étude MLI, nous avons également étudié la méthode des commandes à vitesse variable. Enfin, les composants électroniques utilisés dans notre projet.

Dans le troisième chapitre, nous fournissons les résultats expérimentaux de la simulation PROTEUS et validons les résultats du contrôle de vitesse d'un moteur asynchrone sous Atmega lorsqu'il est alimenté par un variateur de vitesse.

I. Chapitre I : GÉNÉRALITÉS SUR LA
MACHINE ASYNCHRONE
TRIPHASÉE

I.1 Introduction.

Les moteurs asynchrones triphasés sont de plus en plus utilisés dans les applications à vitesse variable. Ils peuvent être la cible de commandes scalaires ($U/f=$ constante) ou vectorielles. Ces machines ont la réputation d'être robustes et bien adaptées aux applications à haute puissance.

Dans ce chapitre, nous allons d'abord apporter quelques notions fondamentales liées aux activités de maintenance et de diagnostic avant de présenter brièvement les différents composants de la machine asynchrone et son principe de fonctionnement.

I.2 Présentation générale de moteur asynchrone triphasé :

Le moteur asynchrone triphasé est largement utilisé dans l'industrie ; Sa simplicité de conception en fait un équipement très fiable qui nécessite peu d'entretien. Il est composé d'un élément fixe, le stator, qui contient le bobinage, et d'une partie tournante, le rotor, qui est bobiné dans une cage de sécurité. Pour éviter la circulation du courant de Foucault, les circuits magnétiques du rotor et du stator sont constitués d'un empilage de fines tôles métalliques.

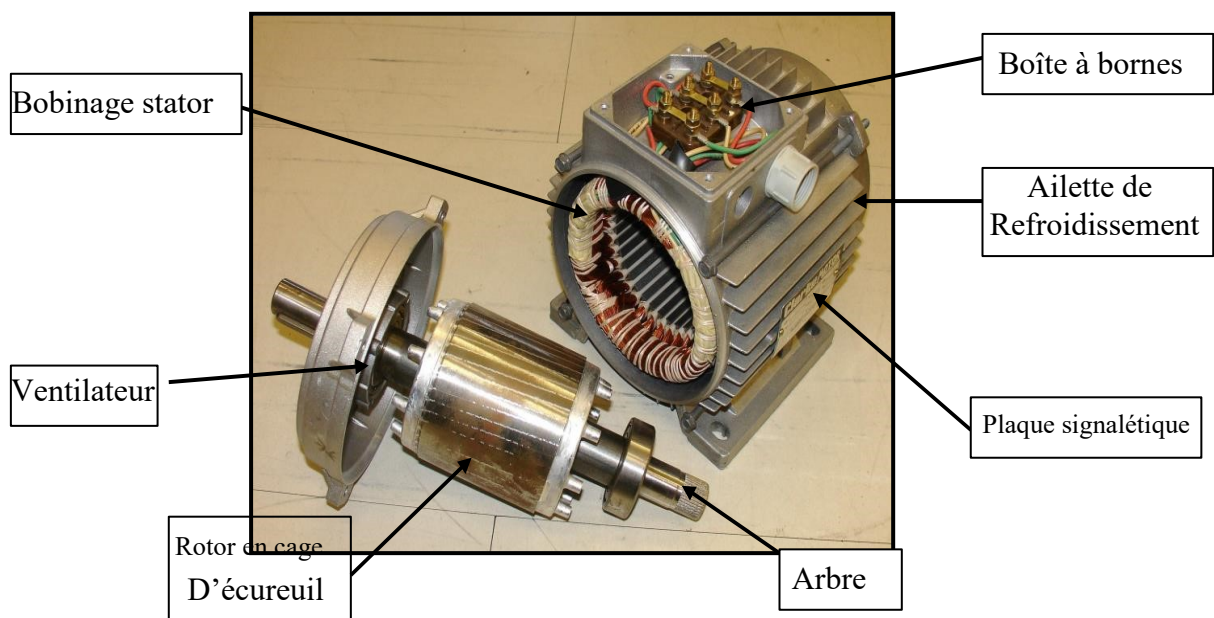


Figure 1. Vue d'un moteur asynchrone triphasé.

I.2.1 Constitution de moteur asynchrone triphasé.

La machine asynchrone est constituée de deux composants principaux :

a Stator.

Le stator est composé de trois enroulements (bobines) reliés par des courants triphasés et possède p paires de pôles ("nombre de bobinages triphasés dans le stator")

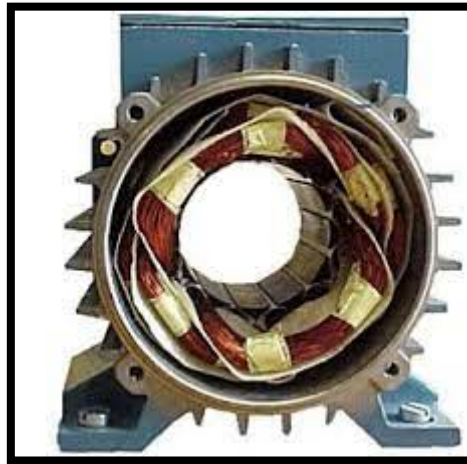


Figure 2. Le stator à cage d'écureuil

Ces bobines sont traversées par des courants de fréquence f , résultant en un champ magnétique tournant à la même fréquence.

$$N_s = F/p$$

N_s : en tr/s P : nombre de paires de pôles

$$HZ : F : fr$$

Les enroulements du stator sont conçus pour être reliés, soit en étoile, soit en triangle.

Le couplage des enroulements est déterminé par la tension de phase nominale de ce moteur, qui est imposée par le réseau.

b Rotor .

Le rotor est la partie tournante du moteur. Le rotor peut être constitué d'un bobinage triphasé, bien qu'il soit plus communément constitué d'une masse métallique,

notamment d'aluminium pour les roulements. Ensuite, il y a le rotor avec la cage de sécurité. [1]



Figure 3. Le rotor à cage d'écureuil

I.2.2 Symbole de moteur triphasé à cage d'écureuil.

Le moteur asynchrone est représenté comme une cage d'écureuil à trois pattes

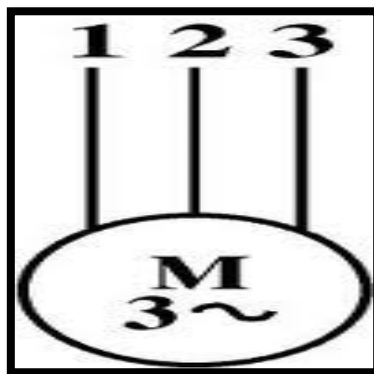


Figure 4. Symbole de moteur asynchrone a cage d'écureuil

I.2.3 Plaque signalétique de MAS.

Le constructeur délivre et certifie la plaque signalétique d'un moteur asynchrone. Elle contient les caractéristiques électriques nominales du moteur.

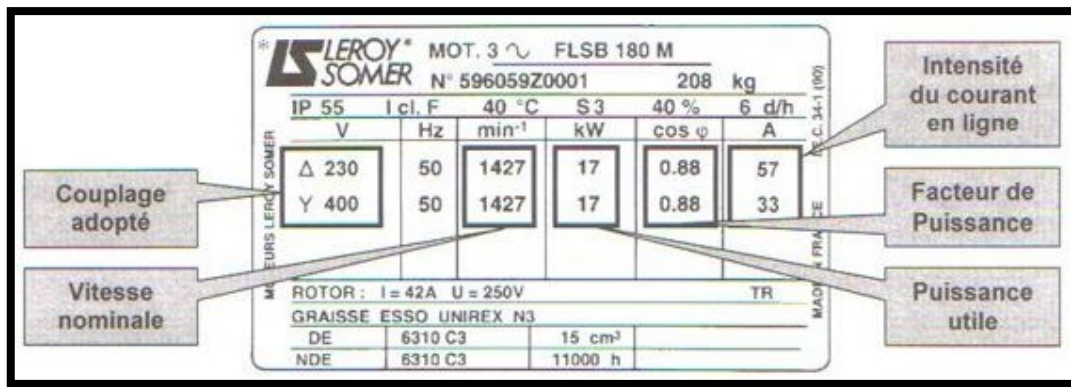


Figure 5. Plaque signalétique de MAS

V : tension (230v/400v) la première indique la valeur nominale de la tension aux bornes d'un enroulement (couplage Δ) La seconde indique la valeur nominale de la tension aux bornes de 2 enroulements (couplage Y). Elle indique le couplage (étoile Y ou triangle Δ) à effectuer en fonction du réseau d'alimentation.

HZ : la fréquence du réseau d'alimentation nécessaire à son fonctionnement.

Min : indique la vitesse nominale du rotor.

KW : Puissance utile délivrée sur l'arbre du moteur.

Cos φ : facteur de puissance permet le calcul des puissances actives et réactives consommées par le moteur.

A : Elles représentent l'intensité absorbée par le moteur pour chacun des couplages. [2]

I.3 Mode de couplage

Il existe deux manières de connecter le moteur au réseau électrique triphasé. Les techniques de montage étoile et triangle. La tension aux bornes de chaque bobine est d'environ 230V avec un branchement en étoile. Chacune des bobines d'une installation en triangle est alimentée à la tension nominale du réseau (400V). Si un moteur 230V doit être connecté à un réseau 400V, ou si un moteur de faible puissance doit être démarré en cas de panne mécanique, le montage en étoile est utilisé.

I.3.1 Couplage étoile.

Voici le schéma de raccordement :

Dans ces circonstances, l'enroulement détecte la tension du réseau simple à ses bornes.

Par exemple, sur un réseau standard 230/400, un moteur couplé en étoile aurait une tension de 230V sur chaque bobinage du stator.

$$V(t) = U / \sqrt{3}$$

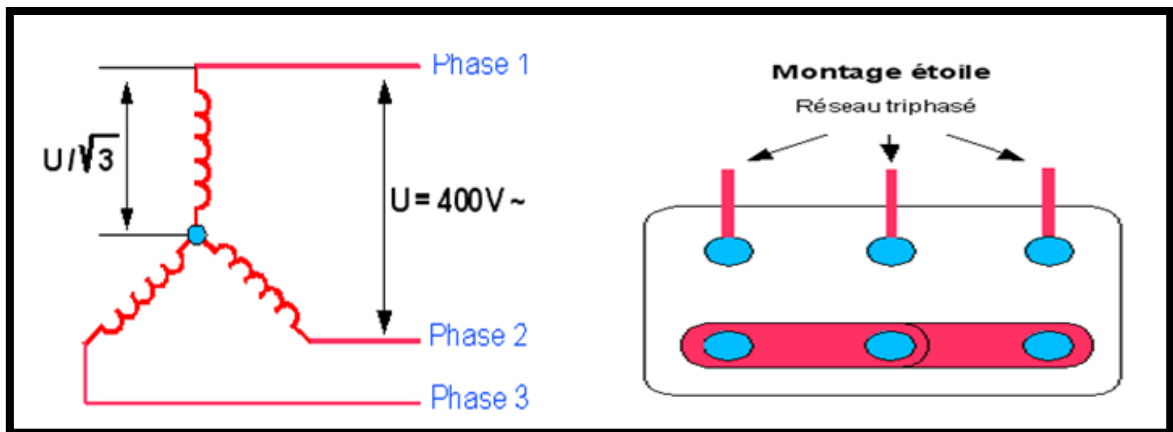


Figure 6. Schéma d'un coupage étoile pour moteur asynchrone

I.3.2 Couplage triangle.

Voici le schéma de raccordement :

Dans ces conditions, l'enroulement constate la déformation du réseau à ses bornes.

Par exemple, sur un réseau standard 230/400, un moteur couplé en étoile aurait une tension de 400V sur chaque bobinage stator.

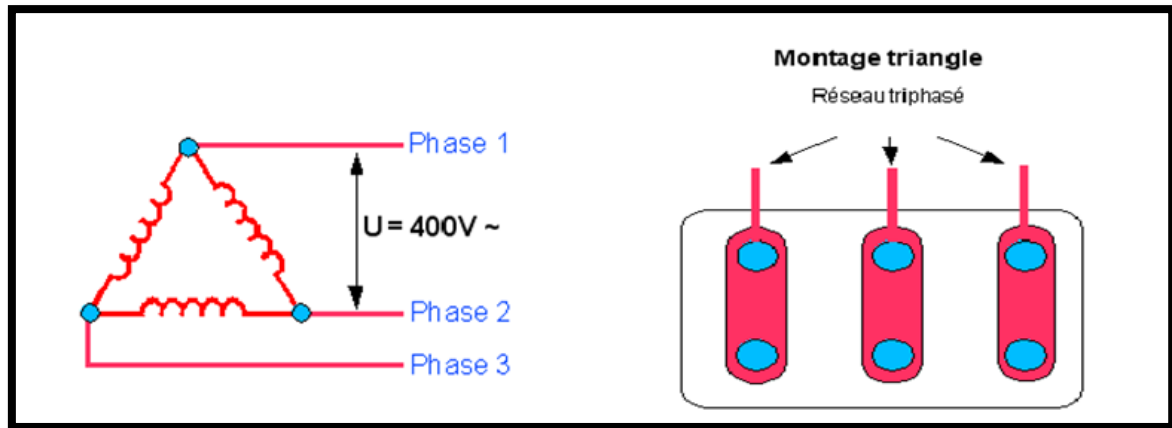


Figure 7. Schéma d'un coupage triangle pour moteur asynchrone

I.4 Rappel des notions de triphasé :

Une alimentation triphasée est composée de trois tensions identiques séparées par un angle $\frac{2\pi}{3}$.

$$e_1 = E \sin(\omega t), \quad e_2 = E \sin(\omega t - 2\pi/3), \quad e_3 = E \sin(\omega t + 2\pi/3).$$

Pour délivrer cette énergie, il faut trois câbles, un pour chacune des tensions (appelées phases), et éventuellement un autre (le neutre) pour permettre le retour du courant lorsque les courants ne sont pas équilibrés.

$$(\mathbf{i}_1 + \mathbf{i}_2 + \mathbf{i}_3 = \mathbf{0})$$

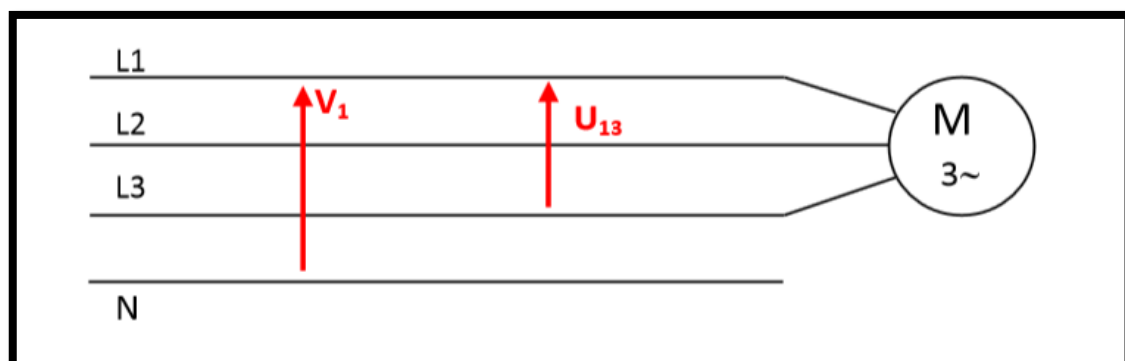


Figure 8. Schéma d'un couplage simple pour moteur asynchrone

On retrouve deux formes de tension :

- Tension simple : tension entre phase et neutre, généralement désignée par la lettre V
- Tension composée : tension entre deux phases, notée par la lettre U :

$$U_{13}=V_1-V_3$$

La relation de valeur effective entre les deux types de tension dans un réseau équilibré est :

$$U=\sqrt{3}.V$$

Le réseau triphasé distribué par SONELGAZ en Algérie est un réseau 230/400 V.

Les formules suivantes peuvent être utilisées pour calculer la puissance électrique dans un réseau équilibré :

Puissance active en W :

$$P=3.V.J.\cos \varphi = \sqrt{3}.U.I.\cos \varphi$$

Puissance réactive en Var :

$$Q=3.V.J.\sin \varphi = \sqrt{3}.U.I.\sin \varphi$$

Puissance apparente en VA :

$$S=\sqrt{3}. U. I$$

J : Courant traversant un enroulement du moteur.

$$J = I / \sqrt{3} \text{ (couplage Triangle)}$$

$$J = I \quad \text{(couplage Etoile)}$$

I.5 Principe de fonctionnement du moteur asynchrone :

Trois bobines sont fixées sur un circuit magnétique, appelé stator, et sont alimentées par un réseau triphasé de tensions, dont chacune est de 120 degrés. Ils produisent une rotation magnétique à travers le bobinage statorique, qui s'exerce sur un

cylindre en aluminium appelé rotor. Le rotor est réglé pour tourner dans le même sens que le champ tournant mais à une vitesse légèrement inférieure, d'où le terme asynchrone.

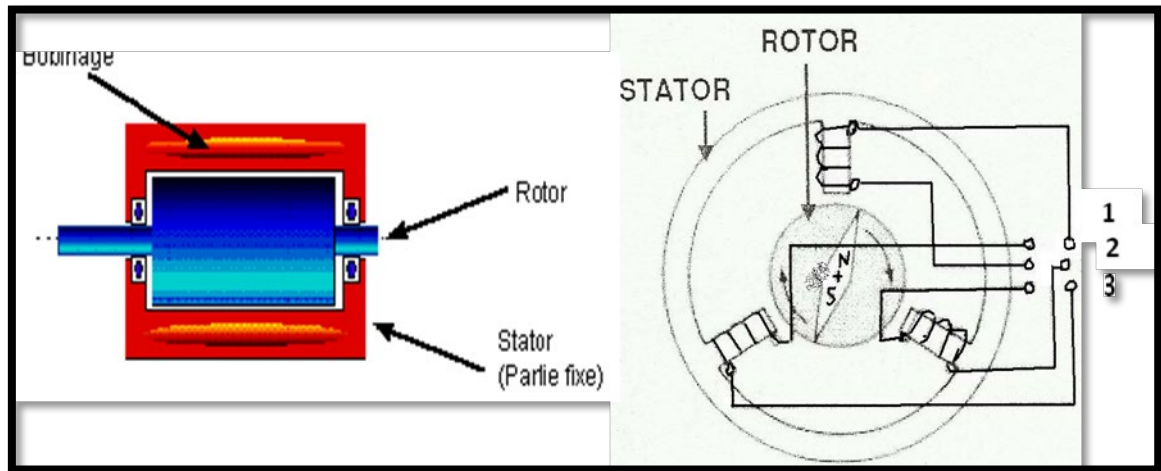


Figure 9. Schéma de principe d'un moteur asynchrone

Le principe des moteurs à courant alternatif repose sur l'utilisation d'un champ magnétique tournant produit par des contraintes alternatives.

Un champ magnétique \mathbf{B} est créé lorsqu'un courant circule dans une bobine. Ce champ est dans l'axe de la bobine, sa direction et son intensité sont déterminées par le courant \mathbf{I} .

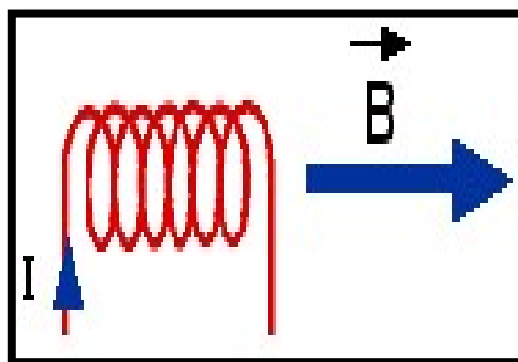


Figure 10. Champ magnétique créé par un courant dans une bobine

Si le courant est alternatif, le champ magnétique change de direction et d'amplitude au même rythme que le courant.

Lorsque deux bobines sont rapprochées, le champ magnétique produit est égal à la somme vectorielle des deux autres. Dans le cas d'un moteur triphasé, les trois bobines sont disposées dans le stator à 120 degrés l'une de l'autre, ce qui donne trois champs magnétiques.

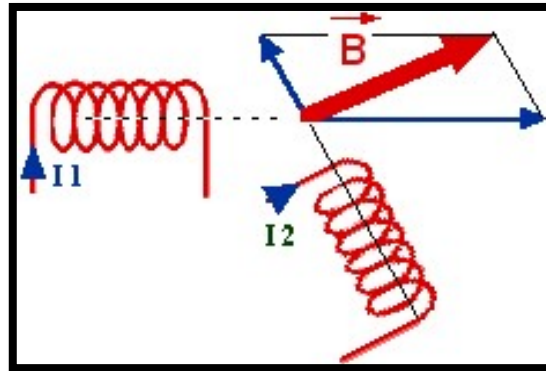


Figure 11. Champ magnétique créé par un courant dans une bobine

En raison de la nature du courant sur le réseau triphasé, les trois domaines sont dégagés (chacun passe par un maximum). Le champ magnétique résultant tourne à la même fréquence que le courant, soit $50 \text{ tr/s} = 50 \text{ Tr/s} = 3000 \text{ tr/mn}$.

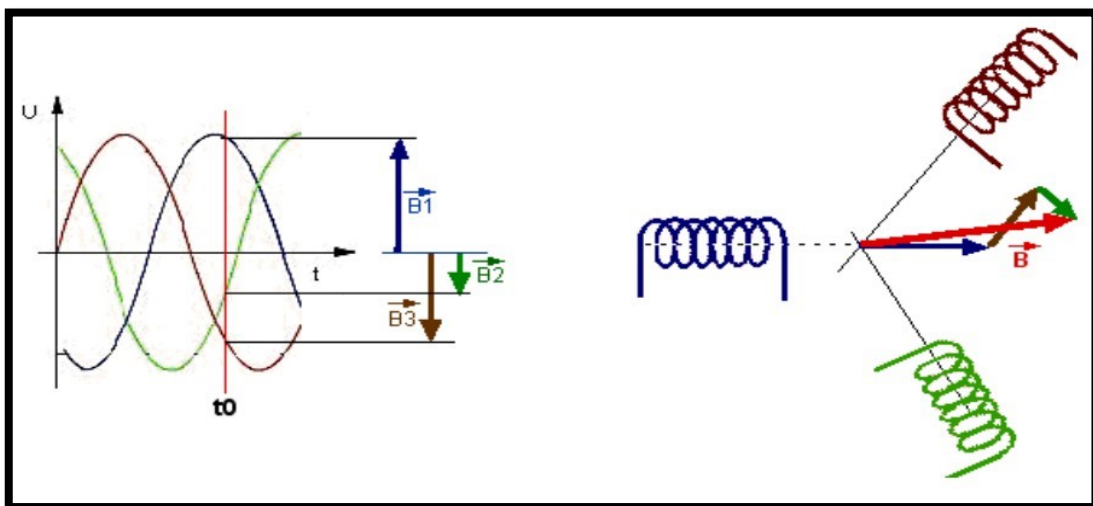


Figure 12. Champ résultant créé par trois bobines traversées par un courant

Les trois enroulements statiques forment un champ magnétique tournant, dont la fréquence de rotation est appelée fréquence de synchronisation. Si une boussole est placée au centre, elle tournera à cette vitesse de synchronisation.

Le rotor est constitué de barres d'aluminium reliées par un circuit magnétique. Ces barres sont reliées à leurs extrémités par deux anneaux conducteurs et forment une "cage de sécurité". Cette cage est en fait une bobine de grande section à très faible résistance.

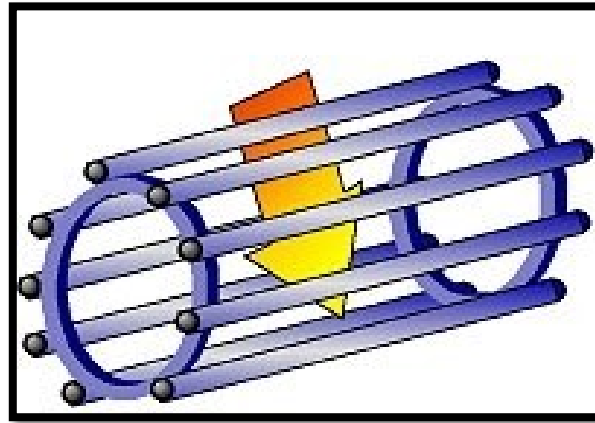


Figure 13. Cage à écureuil du moteur asynchrone

Cette cage est traversée par un champ magnétique tournant. Les conducteurs sont alors parcourus par des courants induits de Foucault, qui circulent dans les anneaux formés par la cage, les forces de Laplace exerçant un couple sur le rotor, et selon la loi de Lenz, les courants induits s'opposent par leur effet sur la cause qui leur a donné naissance. Le rotor tourne dans le même sens que le champ, mais à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de synchronisation.

La fréquence de la source qui alimente le moteur détermine la vitesse de rotation de la couronne. Si la fréquence actuelle est de 50 Hz, le champ effectue une rotation complète en $1/50$ s, soit 50 rotations par seconde.

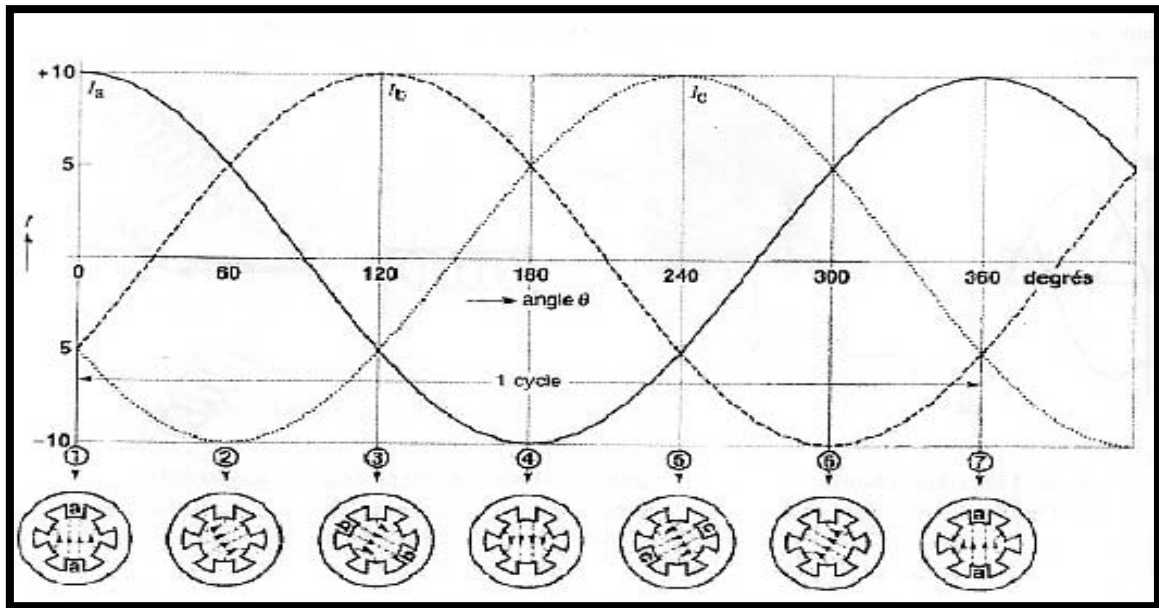


Figure 14. Courants instantanés circulant dans les enroulements et position correspondante du champ magnétique

I.5.1 Vitesse de synchronisme :

La vitesse de synchronisation des moteurs asynchrones triphasés est proportionnelle à la fréquence du courant entrant et inversement proportionnelle au nombre de paires de pôles qui composent le stator.

$$N_s = F/P$$

N_s : vitesse de synchronisme en tr/min

F : fréquence en HZ

P : nombre de pôles

I.5.2 Glissement et vitesse de glissement :

Lorsque le moteur n'est pas chargé, il tourne à une vitesse proche de la vitesse synchronisée. Lorsque vous le chargez, il ralentit. Les barres du rotor sont ensuite coupées

par la couronne rotative à une vitesse plus rapide. En conséquence, la tension et le courant inductifs dans le rotor augmentent, formant un couple suffisant pour décharger la charge mécanique créée par le moteur. C'est exactement la même chose que le couple imposé.

La vitesse relative angulaire du champ tournant est $\Omega_g = \Omega_s - \Omega_r$. ce qui correspond à la vitesse relative angulaire du rotor.

La différence entre les vitesses synchrone et rotor est la vitesse de glissement du moteur asynchrone $n_g = n_s - n_r$

De plus, le glissement du moteur asynchrone est la différence entre la vitesse synchrone et rotorique exprimée par rapport à la vitesse synchrone ; donc, on peut écrire :

$$S = (n_s - n_r) / n_s = n_g / n_s$$

S : glissement [p u]

n_r : vitesse du rotor [r/min]

n_s : vitesse synchrone [r/min]

n_g : vitesse du glissement

Lorsque le rotor tourne dans le même sens que le champ tournant, la valeur de n_r est positive. Lorsque la valeur relative (p u) du glissement est multipliée par 100, le glissement en pourcentage est obtenu. Le glissement d'un moteur tournant à vide est presque nul, alors qu'il est de 1 (ou 100 %) lorsque le rotor est à l'arrêt.

I.6 Caractéristique du moteur asynchrone :

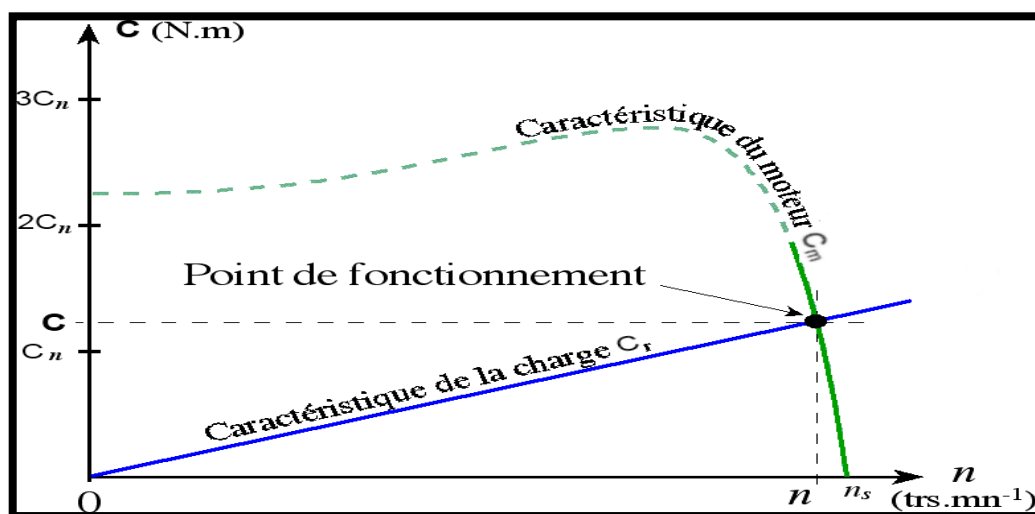
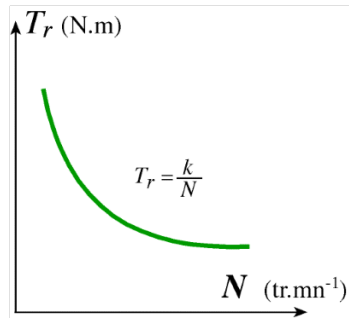


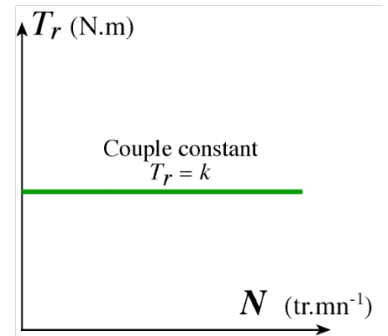
Figure 15. Caractéristique du moteur asynchrone

Exemple de charge :

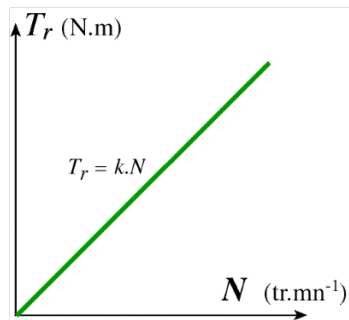
Machine à puissance de sortie constante (enrouleur, compresseur, essoreuse)



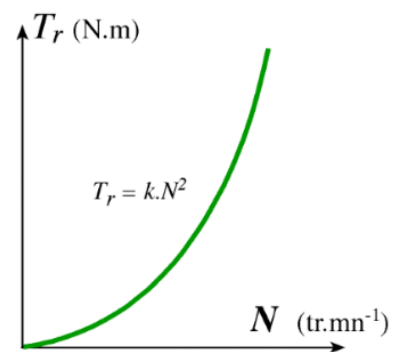
Machine à accouplement continu (lavage, pompe)



Machine avec un couplage à vitesse proportionnelle (pompe volumétrique, mélangeur)



Machine à couplage proportionnel au carré de la vitesse (ventilateur)



I.7 Le bobinage :

Les bobines sont stockées dans les encoches du stator. Si chacune des trois phases possède une paire de pôles magnétiques, la fréquence de synchronisation sera de 3000 tr/mn.

Il est possible d'obtenir des moteurs avec des fréquences de rotation différentes en augmentant le nombre de paires de pôles.

3000 tr/mn = 1 paire de pôles

1500 tr/m = 2 paires de pôles

Les bobines sont reliées au réseau au niveau de la plaque portée située au-dessus du moteur. En conséquence, il y a 6 connexions, une pour chacune des extrémités des trois bobines. Selon le schéma, les bobines sont connectées aux bornes.

I.8 Caractéristiques de moteurs asynchrones à cage d'écureuil :

I.8.1 Moteur fonctionnant à vide :

Lorsque le moteur est éteint, le courant se situe entre 30 % et 50 % du courant de pleine charge. Ce courant est similaire au courant d'excitation d'un transformateur. De ce fait, il est composé d'un courant important qui produit le flux tournant m et d'une petite composante active qui assure les pertes par frottement et aération, ainsi que les pertes dans le fer. Comme le flux traverse à la fois le rotor et le stator, il est assimilable à un flux mutuel. La quantité de puissance réactive nécessaire pour créer le champ tournant est considérable.

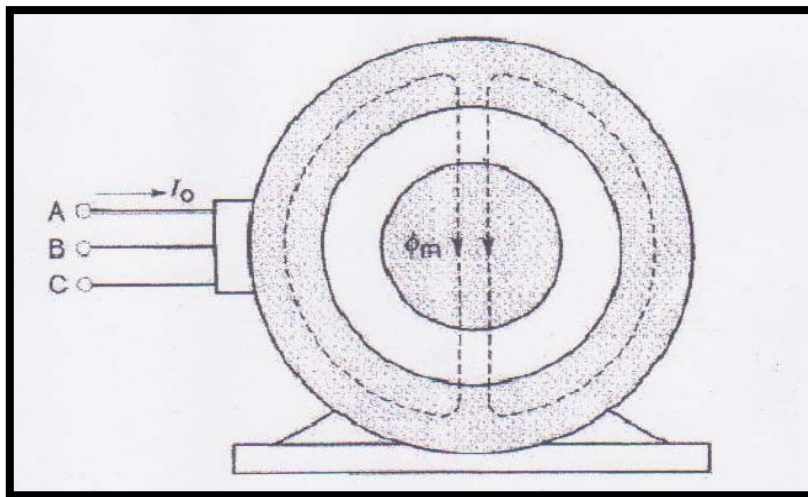


Figure 16. . Caractéristique du moteur asynchrone

I.8.2 Moteur fonctionnant à pleine charge :

Le moteur est alimenté et le courant traversant le rotor produit un FMM qui tend à modifier le flux mutuel, provoquant la circulation d'un courant dans le stator, le FMM s'opposant à celui créé par le rotor. Ces FMM sont assez similaires à ceux produits par les étages primaire et secondaire d'un transformateur de charge. En conséquence, en plus du flux mutuel m , les flux de vol $\phi f1$ et $\phi f2$ sont créés. Lorsque le moteur est alimenté, la puissance réactive (K var) nécessaire pour générer ces trois flux est légèrement supérieure

à celle requise lorsque le moteur est éteint. La puissance active (KW) absorbée par le moteur, quant à elle, varie proportionnellement à la charge mécanique.

Lorsqu'ils sont complètement chargés, le flux mutuel m diminue, mais le rotor et le stator génèrent des flux. Après cela, il y a une légère augmentation de la puissance réactive.

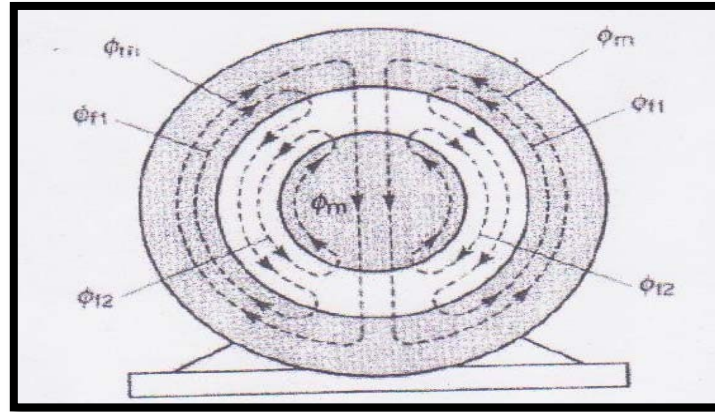


Figure 17. Fonctionnement de moteur en charge

I.9 La mesure de la puissance absorbée: [3]

a. Mesure de la puissance absorbée :

Cette méthode reste identique que le couplage soit en étoile ou en triangle, il utilise deux wattmètres numériques qui doivent être branchés comme suit

$$P = P_1 + P_2$$

P : la puissance active absorbée en watts [W]

P1 : la lecture du premier wattmètre [sans unités]

P2 : la lecture du second wattmètre [sans unités]

b. La puissance réactive :

La puissance Q réactive du moteur est calculée à partir de deux relevés de wattmètre à l'aide de la formule suivante :

$$Q = \sqrt{3} (P_1 - P_2)$$

Q : la puissance réactive absorbée en V.A.R [vars]

P1 : la lecture du premier wattmètre [sans unités]

P2 : la lecture du second wattmètre [sans unités]

c. La puissance apparente :

La puissance perçue du moteur peut être calculée à l'aide de l'équation suivante :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

S : la puissance apparente du moteur en V.A [V.A]

P : la puissance active absorbée en watts [W]

Q : la puissance réactive absorbée en V.A.R [vars]

V.A.R : volts ampères réactifs

d. Bilan des puissances :

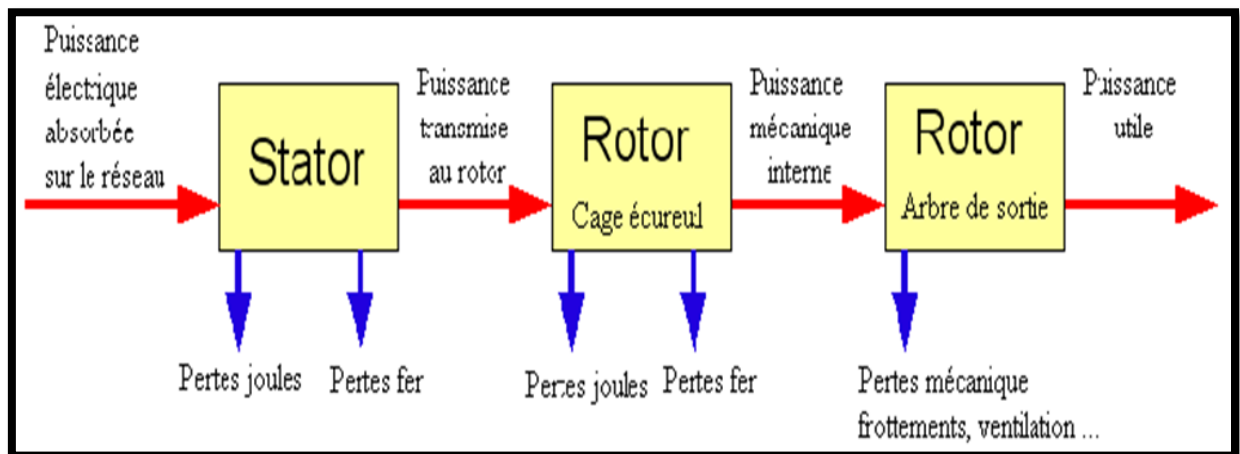


Figure 18. Bilan des puissances

e. Rendement :

Le rendement d'un moteur est par définition, le rapport entre la puissance mécanique P_m fournie à la charge et la puissance électrique P_e fournie au moteur

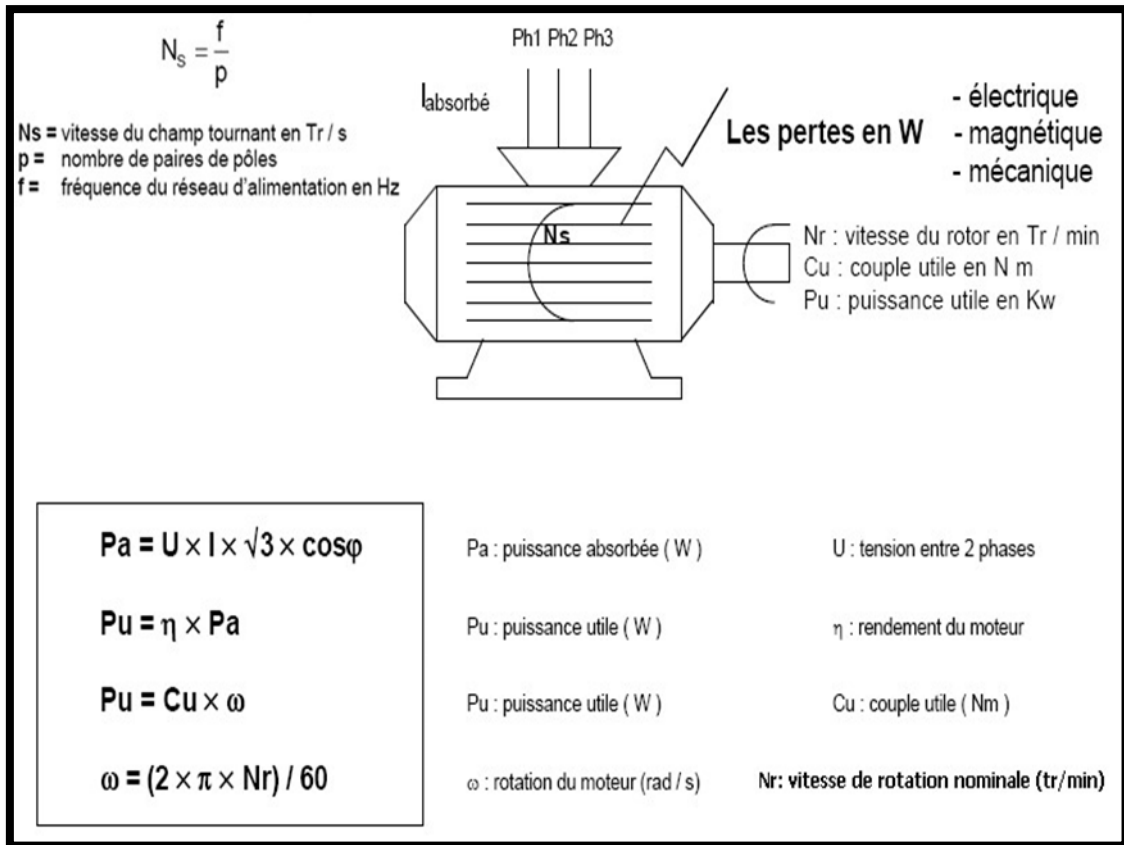


Figure 19. Puissance et rendement

II. Chapitre II :

Les Variateurs de Vitesse

II.1 Introduction.

La majorité des moteurs tournent à vitesse constante. Pour moduler la vitesse des équipements de procédé sur une longue période de temps, divers dispositifs mécaniques sont utilisés.

Nous utilisons maintenant des variateurs de vitesse électroniques.

L'électronique de puissance a fait des progrès significatifs et de plus en plus de variateurs de vitesse à fréquence variable avec moteurs à courant alternatif sont installés. Ces variateurs de vitesse utilisent fréquemment une modulation de largeur d'impulsion (MLI) et des transistors bipolaires à grilles isolées (IGBT).

II.2 Principe de fonctionnement.

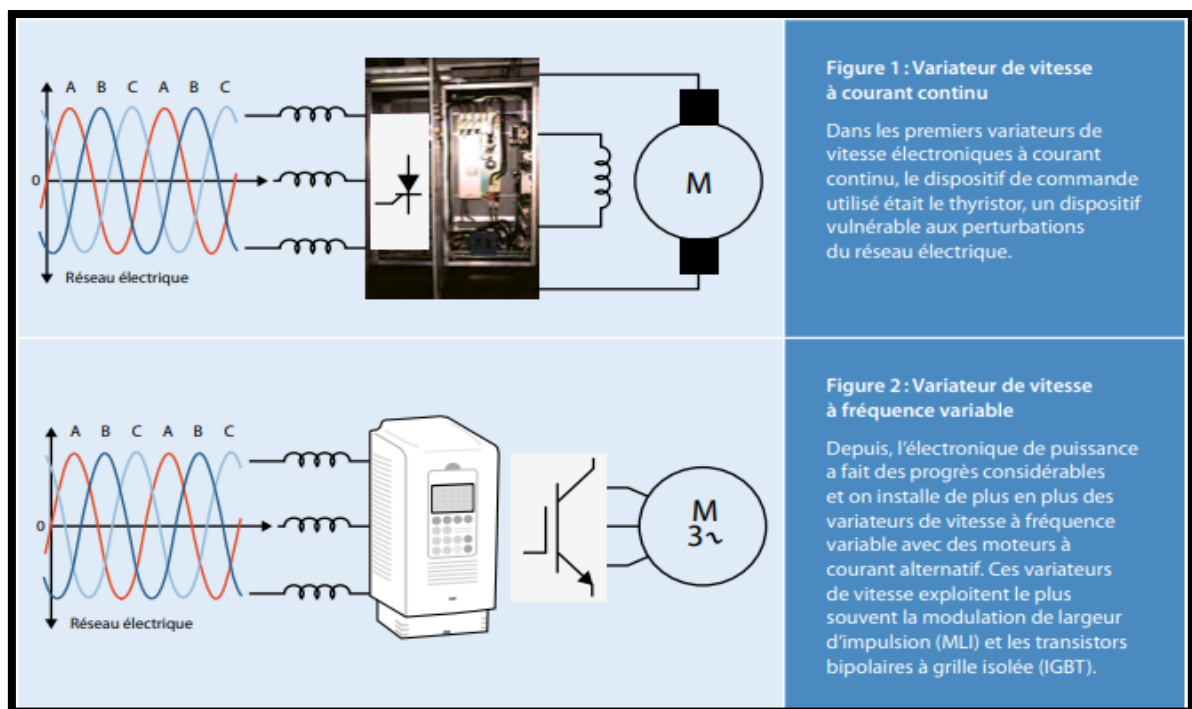


Figure 20. Principe de fonctionnement

Une des caractéristiques d'un moteur à courant alternatif est que la vitesse mécanique du rotor est directement proportionnelle à la fréquence des courants et du stator.

Cette relation relative entre ces deux facteurs nous permet de commander mathématiquement le premier tout en manipulant le second. C'est ce qu'on appelle "la

condition de synchronisme", et elle est utilisée de diverses manières selon que le variateur est asynchrone ou synchrone.

Autrement dit, à chaque vitesse du variateur correspond une fréquence du stator qui lui est dédiée ; ainsi, le contrôle de cette fréquence correspond au contrôle d'une des vitesses du rotor de la machine.

Le principe de fonctionnement d'un variateur de vitesse est donc le suivant :

Les changements mécaniques de vitesse se font par une variation de la fréquence liée au courant du stator.

Les alternateurs vitesse-courant existent depuis plus d'un siècle, mais ils ont eu du mal à percer et à finir par détrôner les fameuses machines à courant continu. Le monde d'aujourd'hui a radicalement changé grâce à toutes les avancées rendues possibles par les variateurs de vitesse, notamment depuis la commercialisation de plusieurs avancées en électronique de puissance.

II.3 Les avantages et les inconvénients d'un variateur de vitesse.

II.3.1 Les avantages d'un variateur de vitesse.

L'utilisation de variateurs de vitesse présente plusieurs avantages significatifs. Le premier avantage évident est que ce type de machine permet un démarrage lent des moteurs, évitant le phénomène de chute de tension et, par la même occasion, l'ouverture des circuits.

Un autre avantage des variateurs de vitesse est qu'ils optimisent la puissance du moteur auquel ils sont reliés. En effet, un moteur à vitesse variable sera bien plus puissant qu'un moteur conventionnel.

Un troisième avantage de l'utilisation d'un contrôleur de vitesse est la précision des vitesses que vous sélectionnez. Cela vous permet de contrôler une variable critique dans la production d'énergie de votre moteur ainsi qu'une durée d'utilisation plus longue.

L'un des avantages les plus significatifs des variateurs de vitesse est l'importante économie d'énergie qu'ils permettent sur la consommation des moteurs entraînés par alternateur.

II.3.2 Les inconvénients d'un variateur de vitesse.

Tous les variateurs de vitesse comportant des dispositifs de commutation (diodes, thyristors, IGBT, etc.) construisent une charge non linéaire qui génère des courants harmoniques et des sources de distorsion de ligne (chute ou perturbation de tension) dans le réseau électrique. Si aucune mesure d'immunité n'est prise, cette dégradation de la ligne peut perturber à la fois les équipements électriques du client et le réseau électrique. De plus, des résonances harmoniques peuvent apparaître entre les variateurs de vitesse et les batteries de condensateur.

Les effets négatifs peuvent se présenter comme une défaillance prématurée des équipements électriques (surchauffe des moteurs, des câbles et des transformateurs), une détérioration de l'isolation du moteur de commande ou un arrêt des processus (fluides brûlés).

III. Chapitre III : Simulation

III.1 Introduction.

L'objectif de cette étude est de construire un prototype et de valider les résultats du contrôle de vitesse d'un moteur asynchrone sous Atmega328P afin de sécuriser l'équipement et de faire évoluer progressivement la vitesse pour assurer le fonctionnement du modèle en toute sécurité.

Ainsi, prenons l'exemple d'un ascenseur qui change sa vitesse d'un état d'arrêt à un état de fonctionnement en 10 secondes de sorte que sa vitesse passe de 0 à 15 km par heure dans la période susmentionnée, puis reste constante jusqu'à atteindre l'étage à être atteint, donc la vitesse diminue progressivement de la même manière

Cependant, la quantité d'électricité consommée change avec le changement de charge et de puissance, ce qui affecte la fréquence du moteur.

Etat initiale : 0 vers 15 KM/HEURE la vitesse variée dans une période de 10 seconds avec fréquence qui augmente aussi de 0 vers 50Hz.

Etat marche : la vitesse reste constant (15 KM/HEURE) et la fréquence aussi (Hz).

Etat final : 15 vers 0 KM/HEURE la vitesse variée dans une période de 10 seconds avec fréquence qui diminue aussi de 50 vers 0Hz.

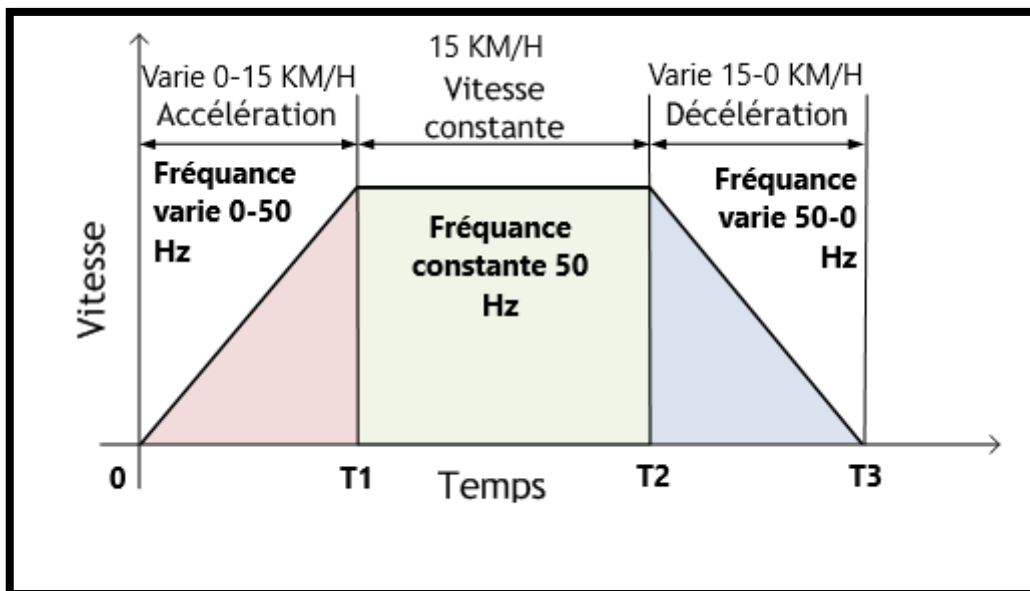


Figure 21. Figure de vitesse de l'ascenseur

III.2 Schéma global

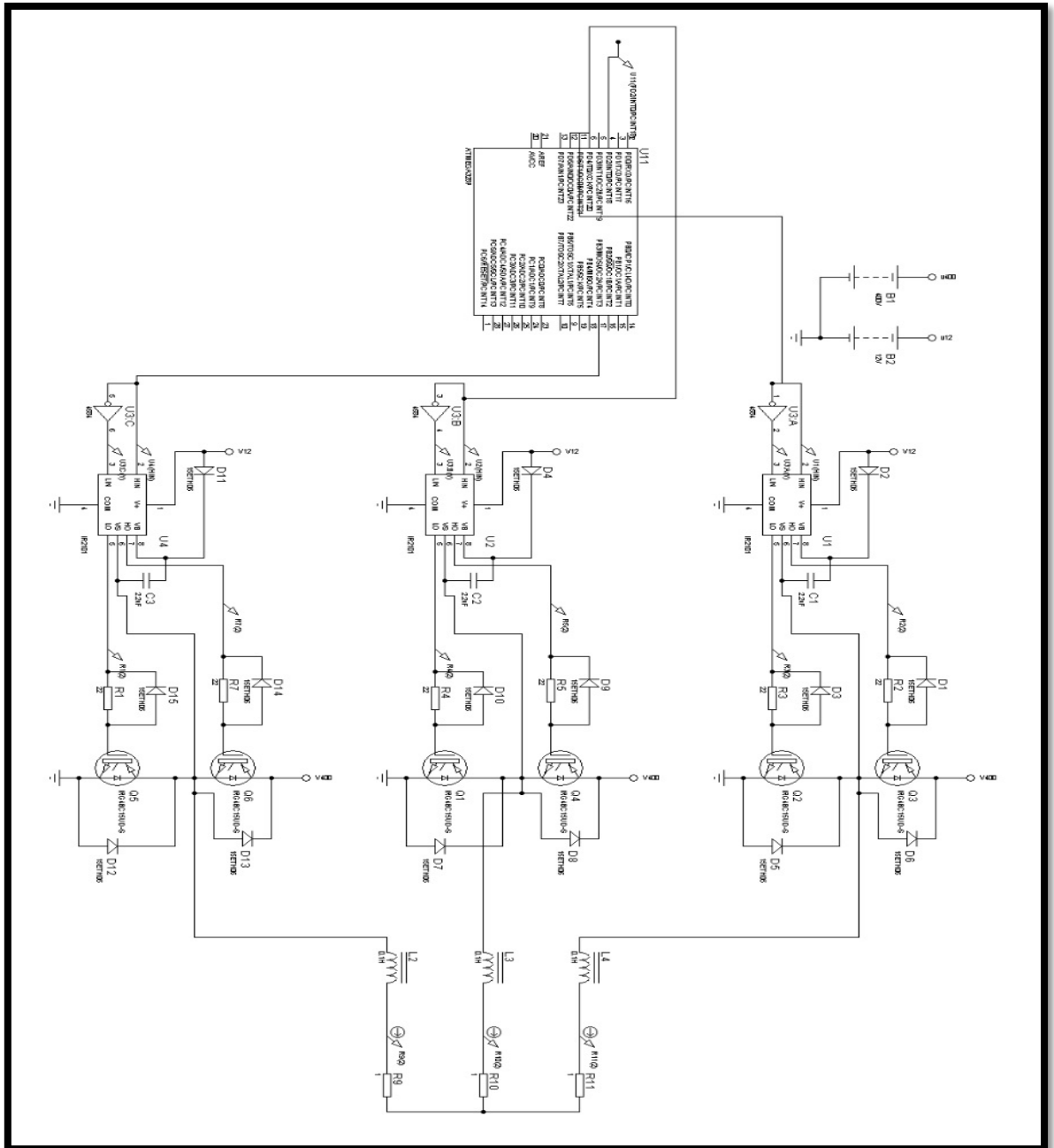


Figure 22. Schéma de simulation programme sur PROTEUS

III.3 Composants utilisés

Le circuit est composé d'un certain nombre d'éléments qui sont :

- transistors IGBT éléments de base qui permettent d'alimenter les bobines du stator.
- drivers IR2101 servant à piloter les IGBT
- microcontrôleur ATMEGA328P. La commande étant numérique, c'est lui qui s'occupe de tous les calculs nécessaires pour délivrer les signaux adéquats qui sont de type PWM. Ces derniers dépendent principalement de la fréquence de sortie désirée et du temps.
- alimentation continue de 400 v. Cette dernière est issue d'un redressement triphasé double alternance dont le schéma sera donné plus bas.
- 3 charges inductives (inductance et résistance) qui font office de bobines du stator.

Dans ce qui va suivre on va voir en détail ces éléments.

III.3.1 Définition et principe de l'IGBT. [4]

Les transistors bipolaires à grille isolée, également appelés IGBT, constituent l'intersection entre les transistors à jonction bipolaires classiques (BJT) et les transistors à effet de champ (MOSFET), ce qui les rend idéaux pour les dispositifs de commutation à semi-conducteurs.

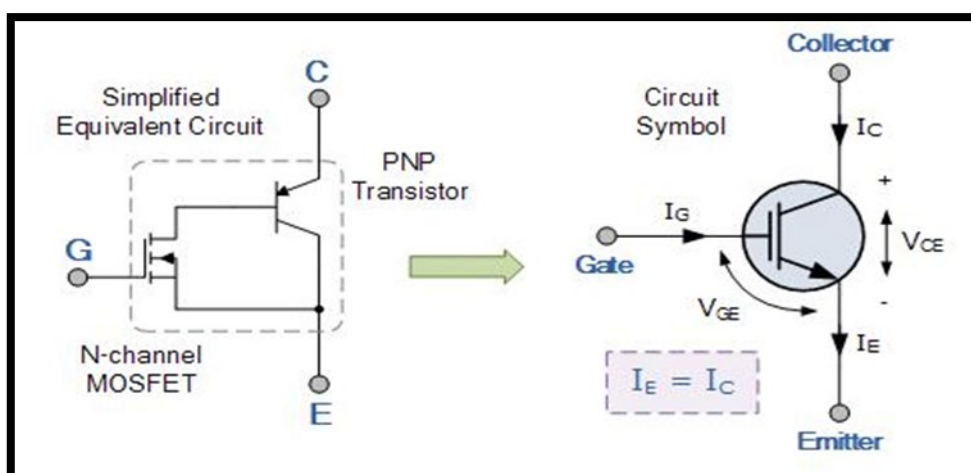


Figure23. Structure intérieure d'un MOSFET

Les transistors IGBT utilisent la meilleure partie de ces deux transistors communs, l'impédance d'entrée élevée et la vitesse de commutation élevée des MOSFET à faible

tension de saturation des transistors bipolaires, et les combinent pour produire un autre type de dispositif de commutation à transistor, à savoir, manipuler jonction collecteur-émetteur avec pratiquement pas de commande de courant de grille.

Un transistor bipolaire à grille isolée (IGBT) combine la grille isolée du MOSFET (d'où la première partie de son nom) avec les caractéristiques de performance de sortie d'un transistor bipolaire classique (d'où la deuxième partie de son nom).



Figure 24. Model d'un transistor IGBT

Le résultat de cette combinaison hybride est que le "transistor IGBT" possède les caractéristiques de commutation et de conduction de sortie du transistor bipolaire, mais il est commandé en tension comme un MOSFET.

Les IGBT sont principalement utilisés dans les applications électroniques de puissance, telles que les onduleurs, les convertisseurs et les alimentations si les transistors MOSFET de puissance ne répondent pas pleinement aux exigences des dispositifs de commutation à semi-conducteurs. Des transistors bipolaires haute tension et haut courant sont disponibles, mais leur vitesse de commutation est lente, alors que les MOSFET de puissance peuvent avoir des vitesses de commutation plus élevées, mais les dispositifs haute tension et haut courant sont coûteux et difficiles à mettre en œuvre.

L'avantage des transistors bipolaires à grille isolée sur les BJT ou les MOSFET est qu'ils fournissent un gain de puissance supérieur aux transistors bipolaires standard, ainsi qu'un fonctionnement à tension plus élevée et des pertes d'entrée MOSFET plus faibles. En fait, il s'agit d'un FET intégré à un transistor bipolaire sous la forme d'une configuration Darlington, comme indiqué.

III.3.2 IR2101 driver.

Les IR2101(S)/IR2102(S) sont haute tension, haute vitesse pilotes MOSFET de puissance et IGBT avec canaux de sortie référencés côté haut et bas. Technologies propriétaires HVIC et CMOS à immunité au verrouillage permettant une construction monolithique robuste. La logique l'entrée est compatible avec la norme CMOS ou LSTTL sortie, jusqu'à 3.3V logique. Les pilotes de sortie disposent d'un étage tampon à courant d'impulsion élevé conçu pour un minimum conducteur croisé. Le canal flottant peut être utilisé pour piloter un MOSFET de puissance à canal N ou un IGBT dans la configuration côté haut qui fonctionne jusqu'à 600 volts.



V_{OFFSET}	600V max.		
$I_{O+/-}$	130 mA / 270 mA	8-Lead SOIC IR2101S/IR2102S	8-Lead PDIP IR2101/IR2102
V_{OUT}	10 - 20V		
$t_{on/off}$ (typ.)	160 & 150 ns		
Delay Matching	50 ns		

Figure 25. Détails du produit et son Packages

III.3.3 Alimentation continue. [5]

Schéma de redresseuse triphasée double alternance

Le redresseur triphasé classique n'utilise pas le neutre. Pour un réseau 230V/400V, il y a 400V entre 2 entrées du redresseur. En effet, entre 2 entrées, il y a toujours une tension composée $U (=400V)$.

Un redresseur non commandé, cela veut dire qu'on ne peut pas régler la tension de sortie moyenne pour une tension d'entrée donnée. Le redressement non commandé utilise des diodes.

Un redresseur commandé permet l'ajustement de la tension de sortie moyenne en jouant sur les retards des amorçages des thyristors (utilisés à la place des diodes). Cette commande nécessite un circuit électronique complexe non étudié ici.

Une diode se comporte comme un thyristor amorcé sans retard, donc passant aussi souvent qu'il le peut.

Le redresseur a cette allure :

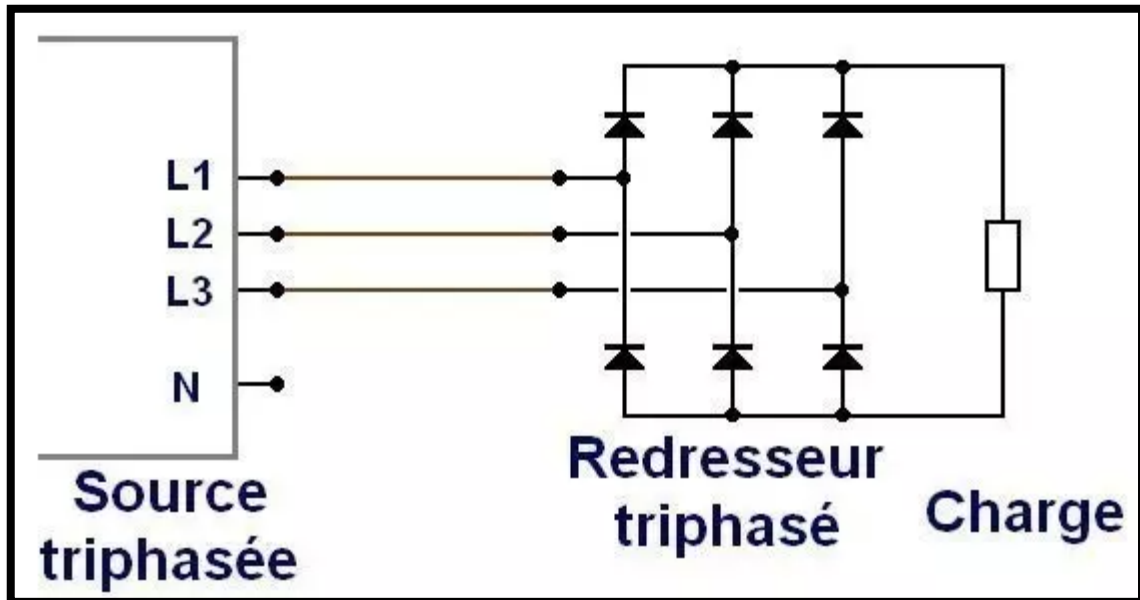


Figure 26. Redressement triphasé double alternance

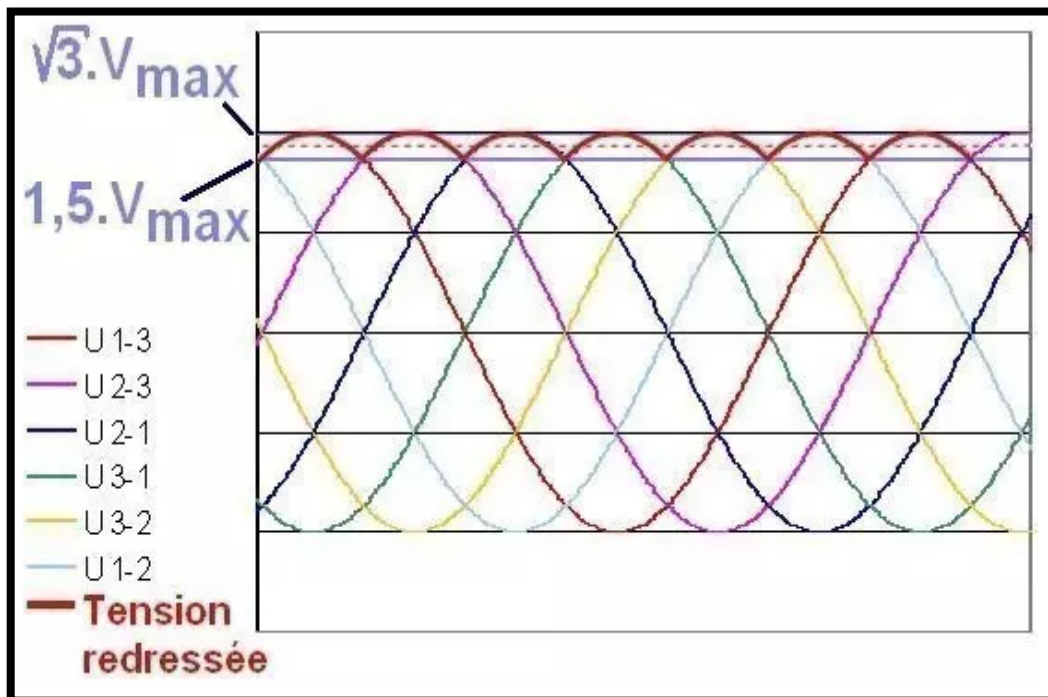


Figure 27. Tension de sortie redressée triphasée double alternance

Il apparaît 7 courbes au total : 6 sinusoïdes et une courbe rouge qui joint le haut des sinusoïdes ("calottes de sinusoïde").

Les 6 sinusoïdes représentent les 3 tensions composées U entre phases et les 3 mêmes tensions mais de signe opposé :

$$U_{31} = -U_{13} \quad U_{23} = -U_{32} \quad U_{21} = -U_{12}$$

La courbe rouge représente la tension en sortie du redresseur, c'est-à-dire aux bornes de la charge résistive. Cette tension n'est pas référencée par rapport au neutre. Elle est flottante. Cette tension fluctue entre $1.5V_{\max}$ et $1.732V_{\max}$ (racine de 3).

V_{\max} est la valeur crête d'une tension simple et vaut $230 \times 1.414 = 325V$

Propriétés de la tension redressée triphasée

Allure de courbe valable seulement sur charge résistive- redressement non commandé (à diodes)- ne repasse pas par zéro, contrairement à la redresseuse mono alternance (pont de Graetz)

L'ondulation est ainsi beaucoup plus faible. Le dimensionnement d'une inductance et/ou d'un condensateur de lissage est ainsi moins contraignant que pour un pont de Graetz.

Pour obtenir une tension de sortie non nulle, il faut au moins 2 phases présentes.

Min, max et valeur moyenne de la tension redressée triphasée

Numériquement, pour un réseau 230V/400V, la tension redressée fluctue entre :

$$\text{tension min} = 1.5V_{\max} = 1.5 \times (1.414 \times 230) = 488V \quad \text{tension max} = 1.732V_{\max} = 1.732 \times (1.414 \times 230) = 563V$$

La valeur moyenne de la tension redressée triphasée est égale à :

$$\text{Tension moy} = 1.654V_{\max} = 1.654 \times (1.414 \times 230) = 538V$$

III.3.4 Unité de traitement des données (ATMega328p). [6]

Le microcontrôleur haute performance RISC micro chip pico Power 8 bits combine la mémoire flash ISP de 32 Ko avec des capacités de lecture en écriture, EEPROM 1024B, SRAM 2KB, 23 lignes d'E/S à usage général, 32 registres de travail polyvalents, trois minuteries flexibles / compteurs avec modes de comparaison, interruptions internes et externes, USART programmable en série, interface série 2 fils orientés octet, port série

SPI, convertisseur A / N 6 canaux 10 bits (8 canaux dans TQFP et QFN / MLF packages), minuteur de surveillance programmable avec oscillateur interne et cinq modes d'économie d'énergie sélectionnables par logiciel. L'appareil fonctionne entre 1,8-5,5 volts.

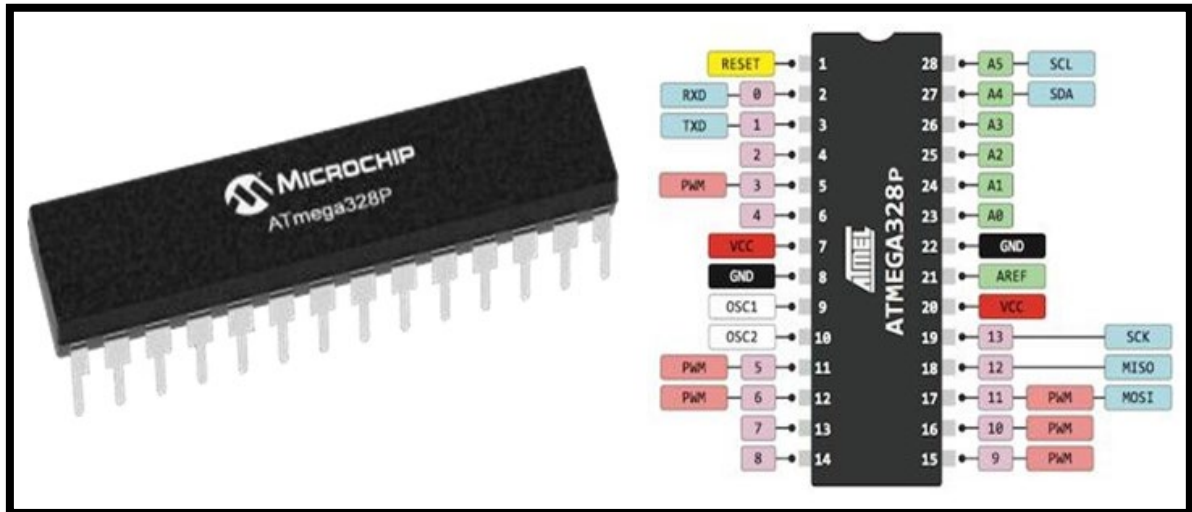


Figure 28. Le microcontrôleur ATMEGA328P

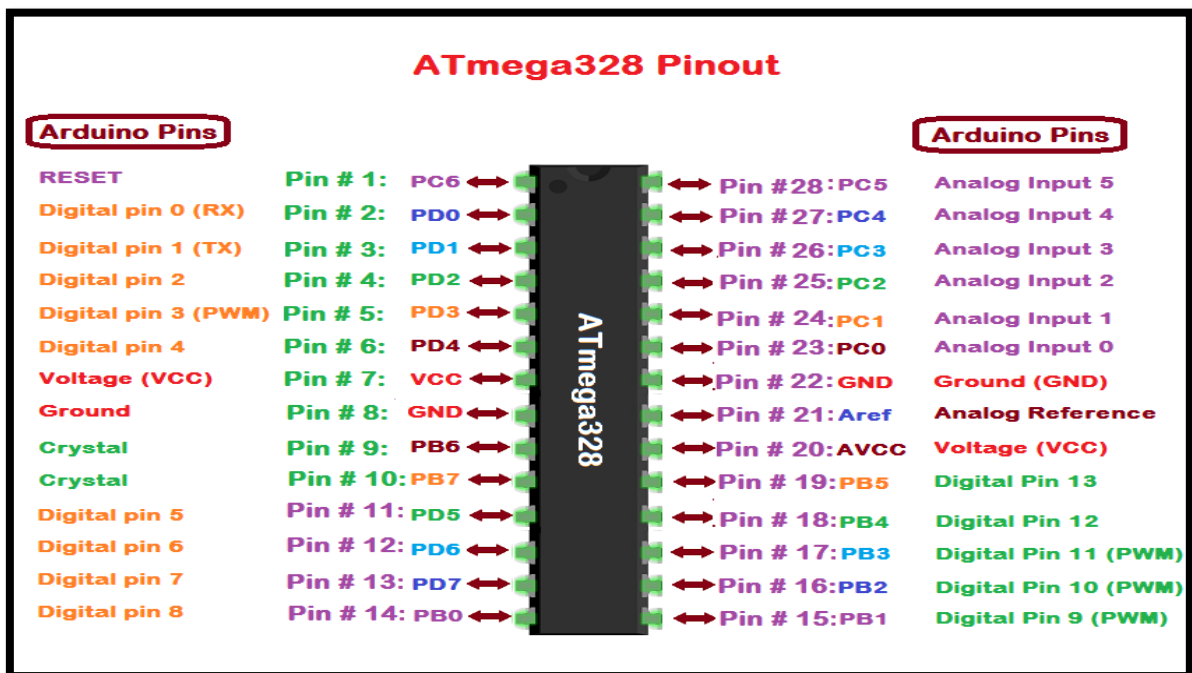


Figure 29. Schéma de microcontrôleur ATMEGA328P

III.4. Les TIMERS : [7]

Un timer est un registre à l'intérieur du microcontrôleur qui s'incrémente (ou se décrémente) chaque fois qu'il reçoit une impulsion d'un signal d'horloge. Ce signal d'horloge peut être propre au microcontrôleur ou bien extérieur à celui-ci. Un timer est donc un compteur capable de compter le temps qui s'écoule, d'où son nom anglais de timer counter. Dans ce qui suit, le timer est toujours employé dans un mode où il s'incrémente, mais dans d'autres modes, il peut se décrémente.

Si le registre du timer comporte 8 bits, il est alors capable de compter de 0 à 255 (en hexadécimal, de 00 à FF). Lorsqu'il arrive à 255 (FF), un coup d'horloge supplémentaire devrait le faire passer à 256 (soit 100 en hexadécimal), ce qui n'est pas possible puisque le registre n'a que 8 bits. Le registre passe donc à 0 ; on dit qu'il subit un débordement (Overflow en anglais), mais ce débordement entraîne la mise à 1 d'un bit bien particulier dans un registre de contrôle associé au timer. Ce bit est appelé un flag (drapeau en anglais) et indique que le timer vient de compter jusqu'à 256, ce qui permet d'attirer l'attention du programmeur, un peu comme ces boîtes aux lettres américaines qui possèdent un petit drapeau qui se dresse chaque fois que le facteur a déposé du courrier à l'intérieur.

L'intérêt d'un timer est qu'il compte sans cesse et que pendant ce temps, le programme peut réaliser autre chose, ce qui n'est pas possible si on utilise la fonction `delay()` qui est bloquante et qui ne permet pas de faire autre chose pendant ce temps d'attente. Le temps que le timer met pour compter 256 coups dépend bien sûr de la fréquence de l'horloge ; à 16 MHz (fréquence du microcontrôleur utilisé dans les modules Arduino), c'est très rapide, mais il est possible de diviser cette fréquence d'horloge grâce à des circuits internes au microcontrôleur appelés prédiviseur (prescaler en anglais). On peut alors diviser la fréquence de base (16 MHz) par 8, 32, 64, 128, 256 ou 1024 ; pour cela, il faut utiliser intelligemment d'autres registres de contrôle associés au timer. Par exemple, si on règle de prédiviseur pour diviser la fréquence par 1024, le timer comptera donc à une fréquence de 15625 Hz.

Comme pour tout registre, on peut lire la valeur d'un timer ou bien écrire une valeur particulière dans le timer. Mais ce qui est surtout important, ce sont les registres de contrôle associés au timer car ce sont eux qui permettent de modifier le comportement du

timer et de contrôler ce qu'il fait. Il faut donc bien les connaître pour bien savoir les utiliser et la lecture de la documentation liée au microcontrôleur est souvent indispensable.

III.4.1 Timers du microcontrôleur de l'ATmega328P.

ATmega328P d'Atmel possède 3 timers :

- Le **timer0**, sur 8 bits, utilisé par les fonctions `delay ()`, `millis ()` et `micros ()`. Il commande également des PWM (Pulse Width Modulation ou Modulation de Largeur d'Impulsion) sur les broches 5 et 6.
- Le **timer1**, sur 16 bits, qui compte de 0 à 65535 (0 à FFFF en hexadécimal) et qui est utilisé par la bibliothèque `Servo` ou bien pour de la PWM sur les broches 9 et 10.
- Le **timer2**, sur 8 bits, qui est utilisé par la fonction `Tone ()` ou bien pour de la PWM sur les broches 3 et 11.

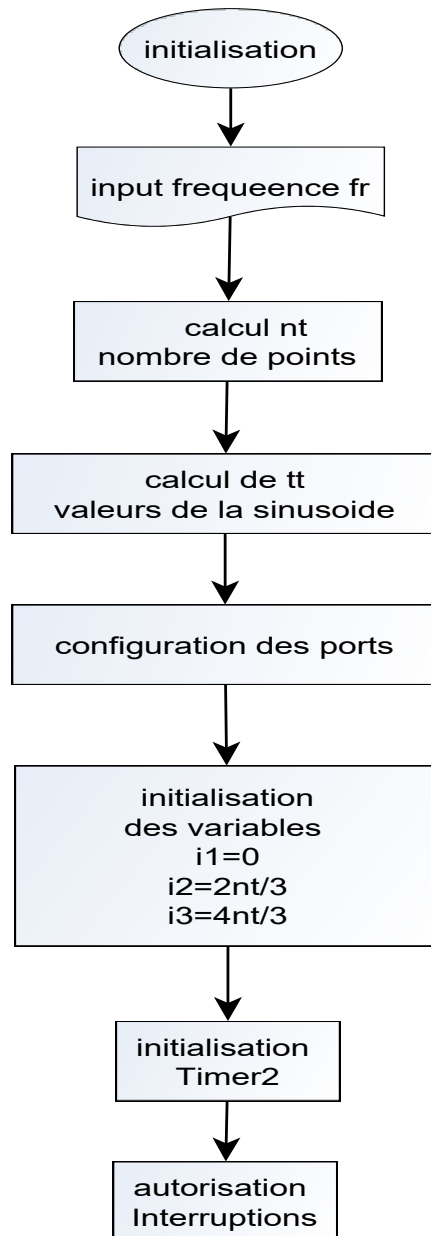
Le langage de programmation fait donc appel aux timers du microcontrôleur mais ceci reste transparent pour le programmeur. Néanmoins, dans quelques cas particuliers, il peut être intéressant de savoir programmer les timers ; dans cet article, nous allons évoquer l'utilisation des timers comme compteur de temps, même si ceux-ci sont capables de faire bien d'autres choses.

Caractéristiques	Valeur
Type de mémoire de programme	Flash
Taille de la mémoire du programme (Ko)	32
Vitesse du processeur (MIPS/DMIPS)	20
SRAM Octets	2048
Données EEPROM/HEF (octets)	1024
Périphériques de communication numérique	1-UART,2-SPI,1-I2C
Capture/comparer/Périphériques PWM	1 capture d'entrée,1 CCP,6 PWM
Timers	2x8bits,1x16bits
Nombre de comparateurs	1
Plage de température (C)	-40à85
Plage de tension de fonctionnement(V)	1,8à5,5
Nombre de broches	32
Batterie faible	Oui

Tableau 1. Tableaufichestechniquesdel'ATMega-328p.

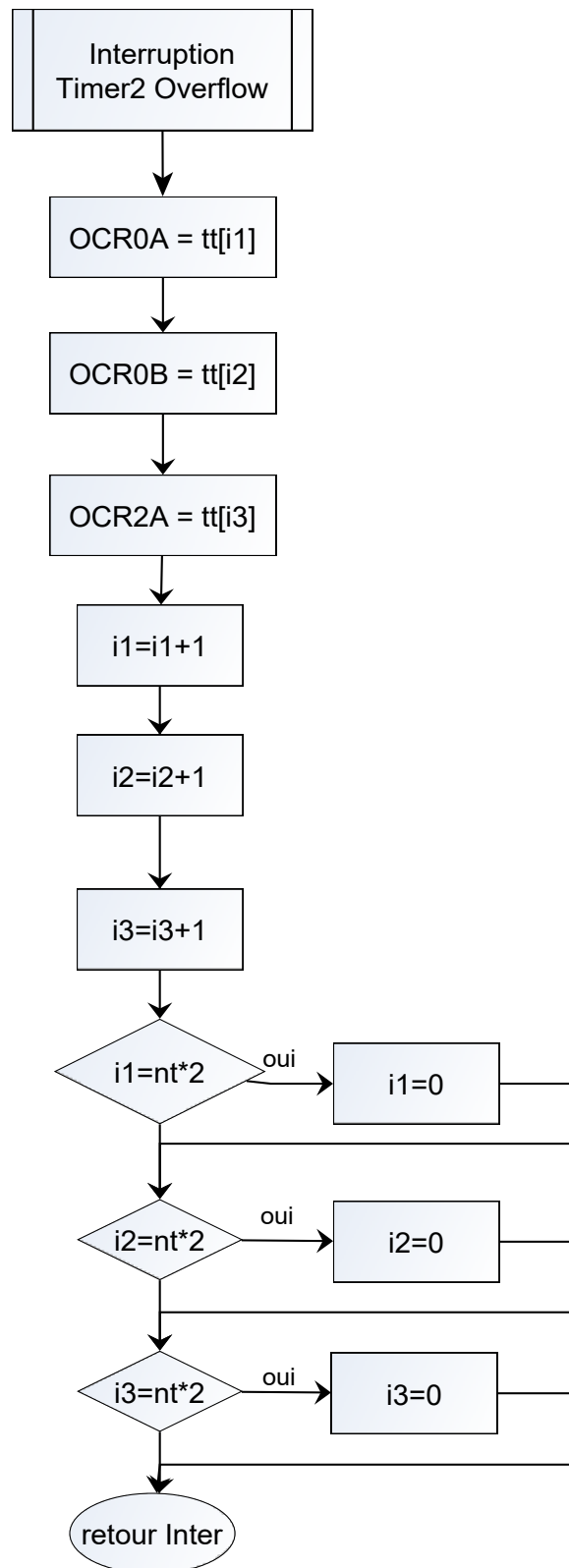
III .4.2 Organigrammes de fonctionnement :

a. Initialisations générales :



Le tableau noté tt est basé sur le calcul instantané des sinusoïdes

$$e_1 = E \sin(\omega t), e_2 = E \sin(\omega t - 2\pi/3), e_3 = E \sin(\omega t + 2\pi/3).$$

b. Interruption timer :

Le Timer est réglé suivant la fréquence désirée

III.5 Résultats de simulation

a Fréquence $F=10$ Hz :

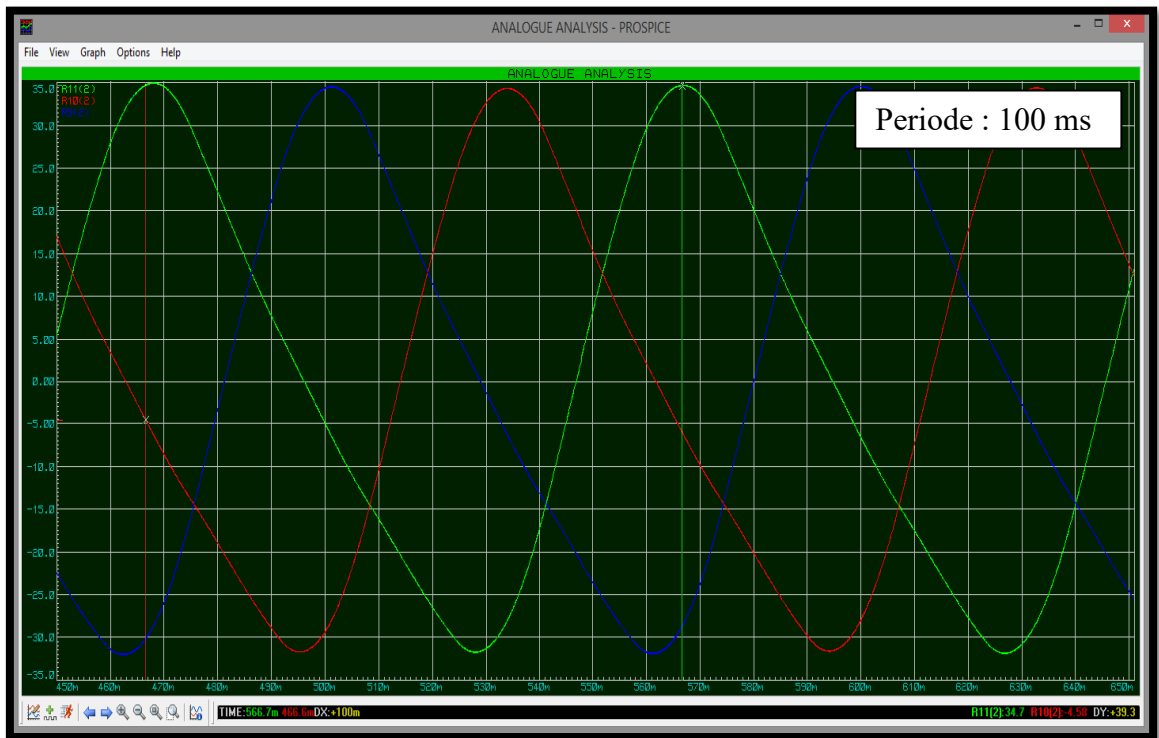


Figure 30. Spectres du courant statoriques du moteur à la fréquence 10 Hz.

b Fréquence $F=15$ Hz :

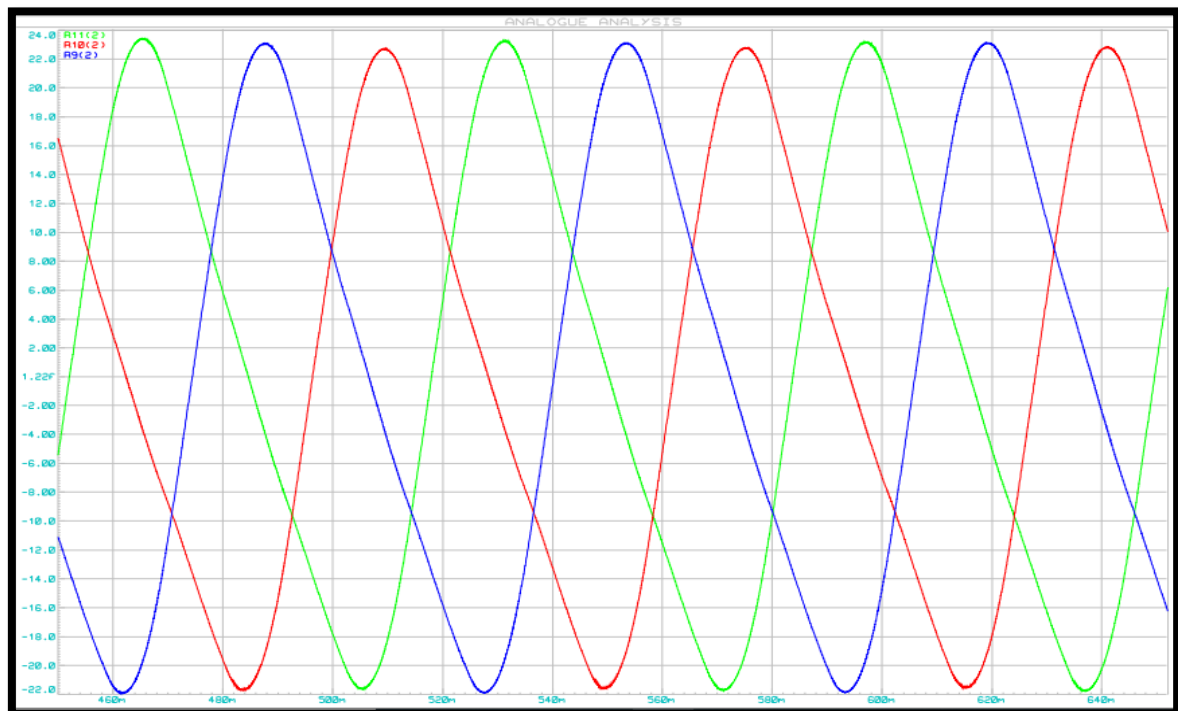
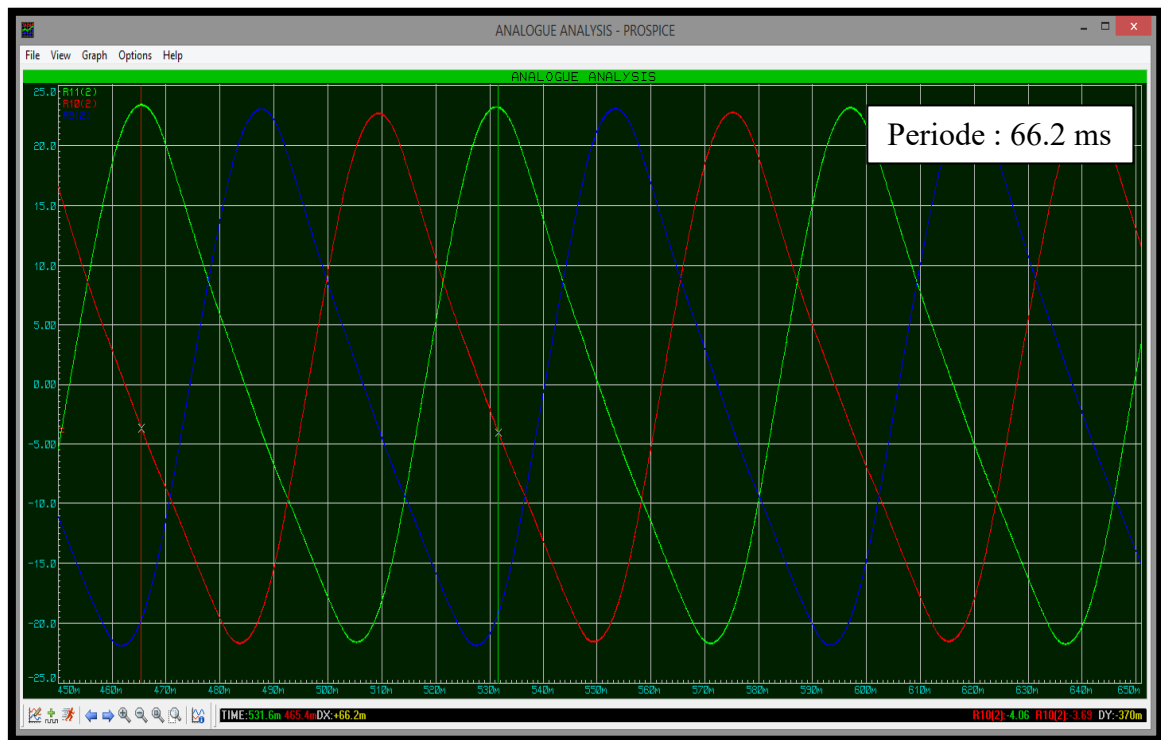


Figure 31. Spectres du courant statoriques du moteur à la fréquence 15 Hz.

c Fréquence $F=20$ Hz :

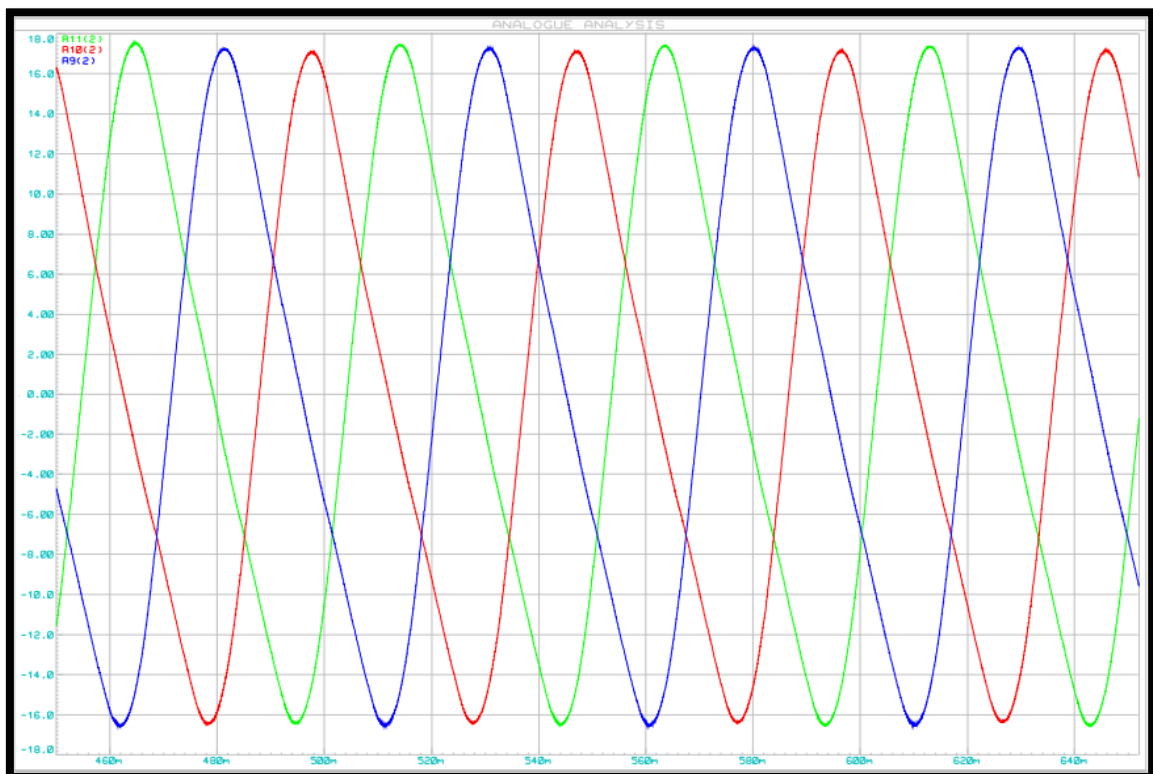
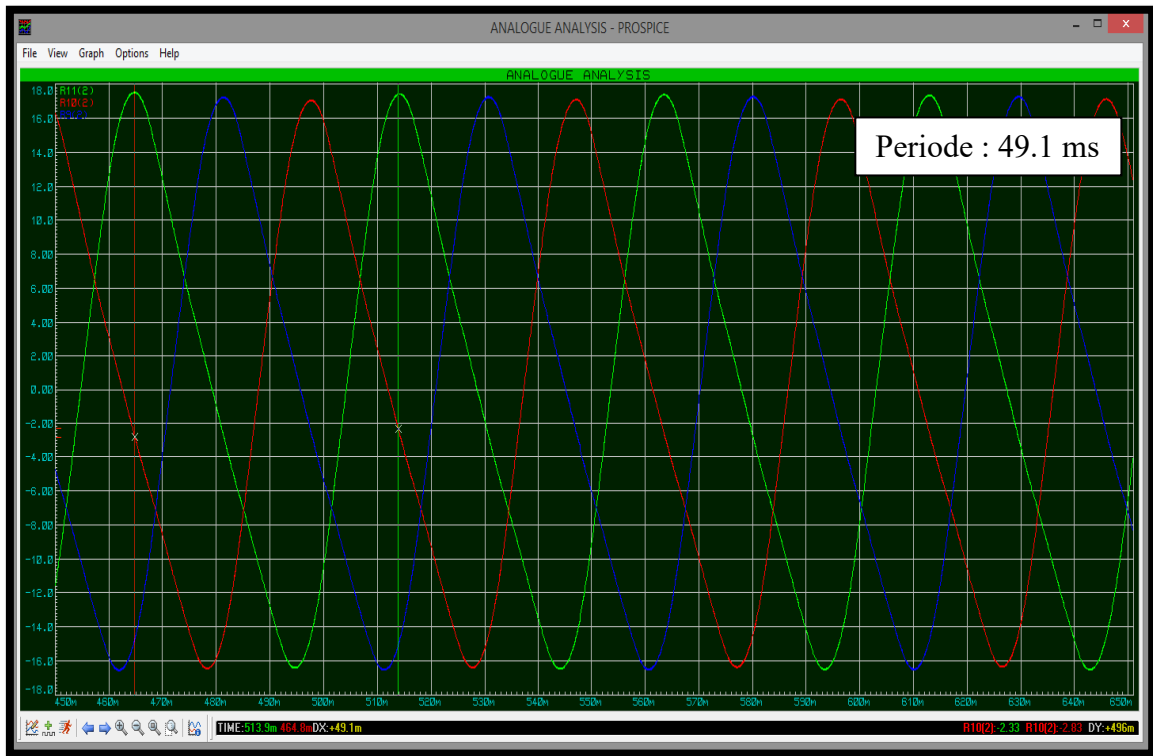


Figure32. Spectres du courant statoriques du moteur à la fréquence de 20 Hz.

d Fréquence $F=30$ Hz :

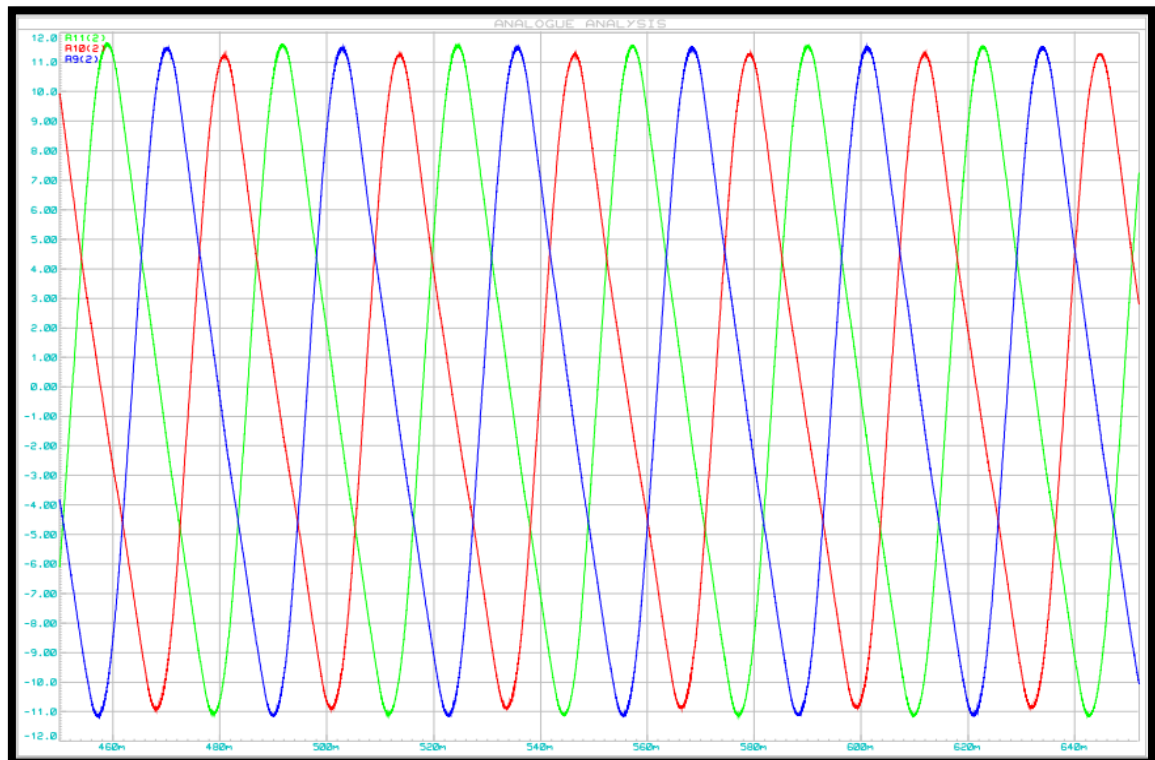
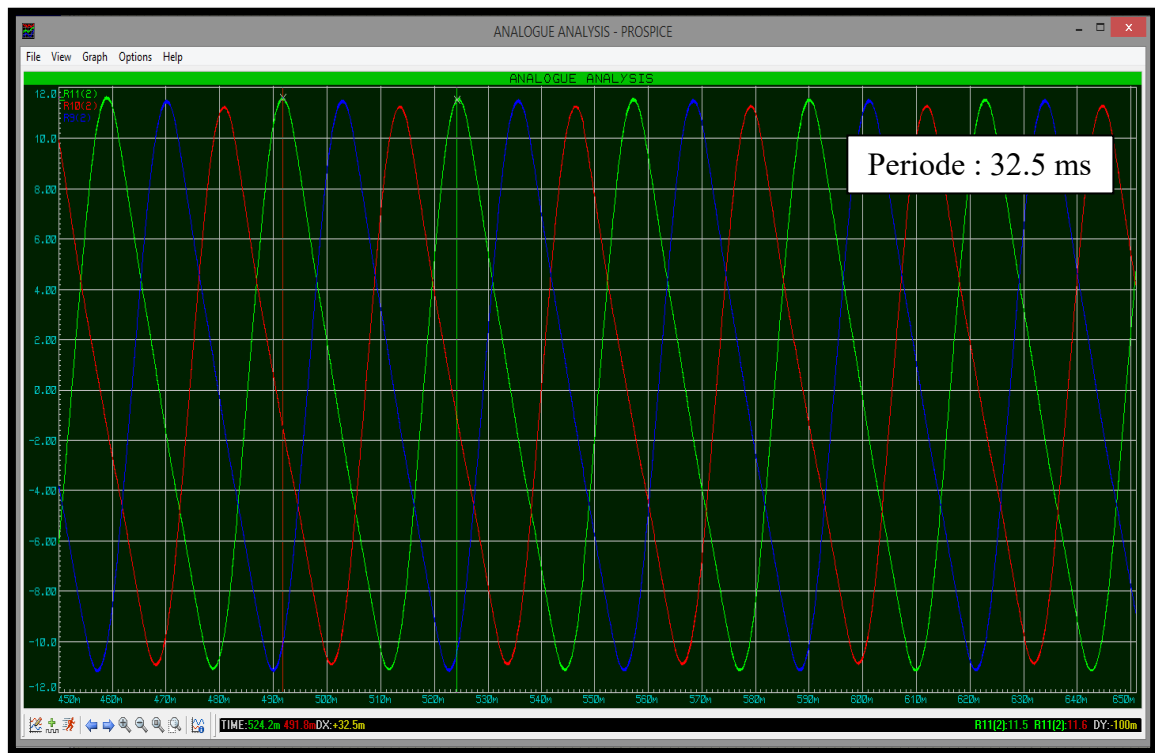


Figure 33. Spectres du courant statoriques du moteur à la fréquence de 30 Hz.

e Fréquence $F=50$ Hz :

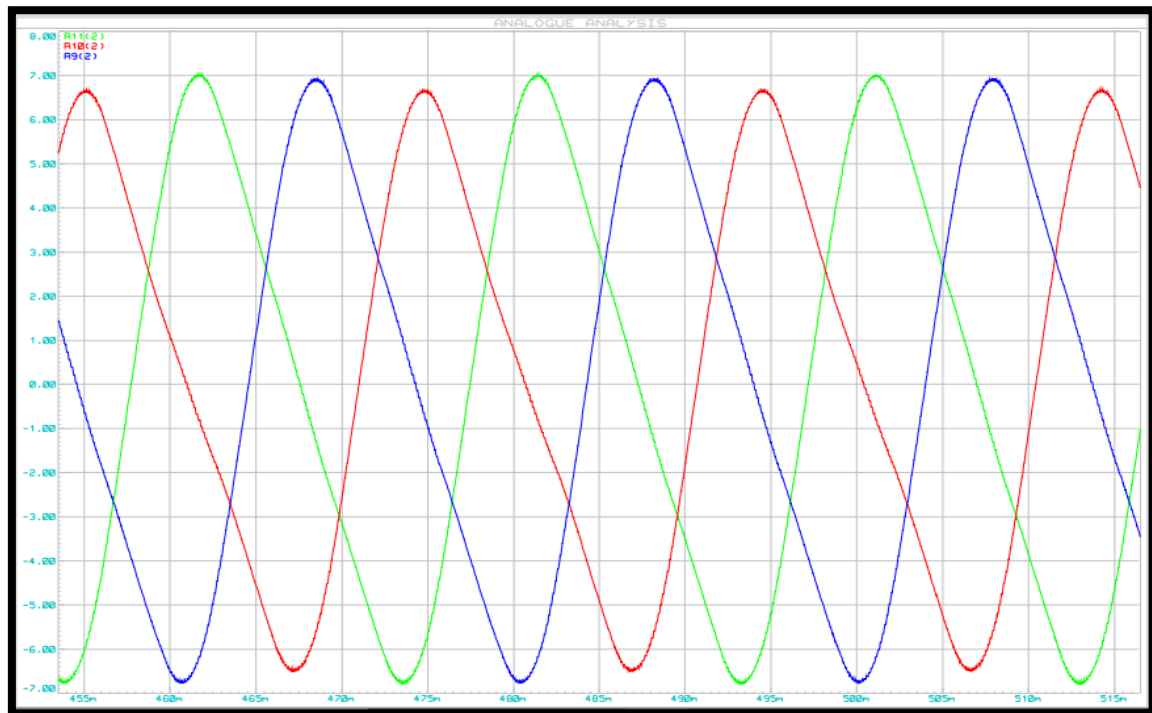
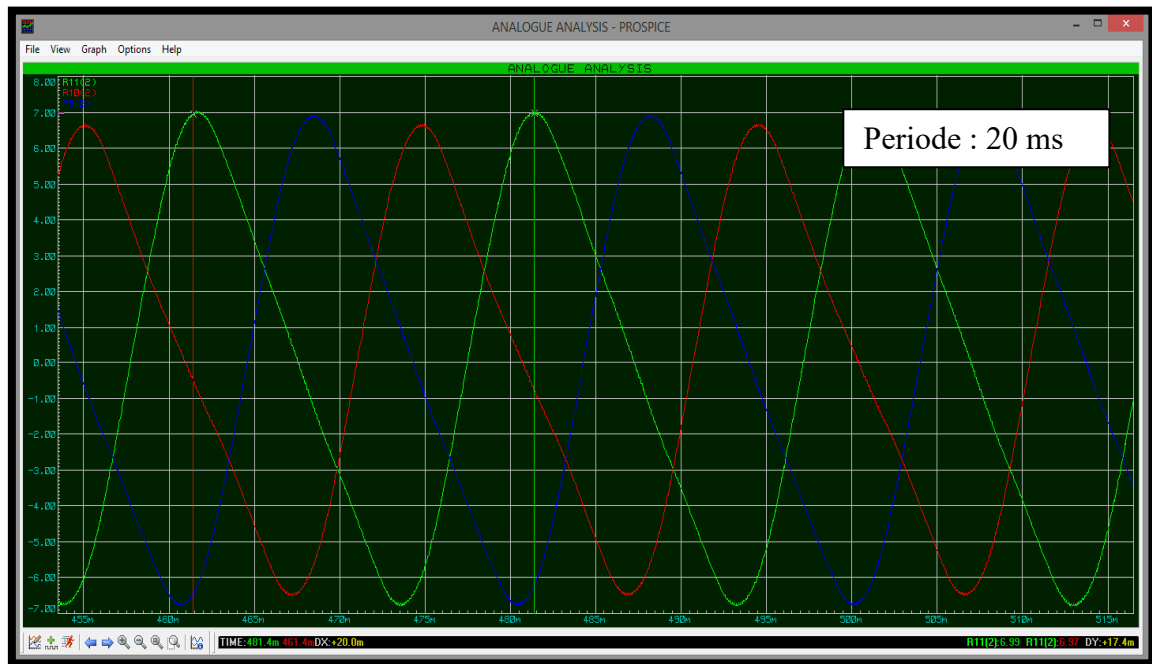


Figure34. Spectres du courant statoriques du moteur à la fréquence 50 Hz.

f Fréquence $F=80$ Hz :

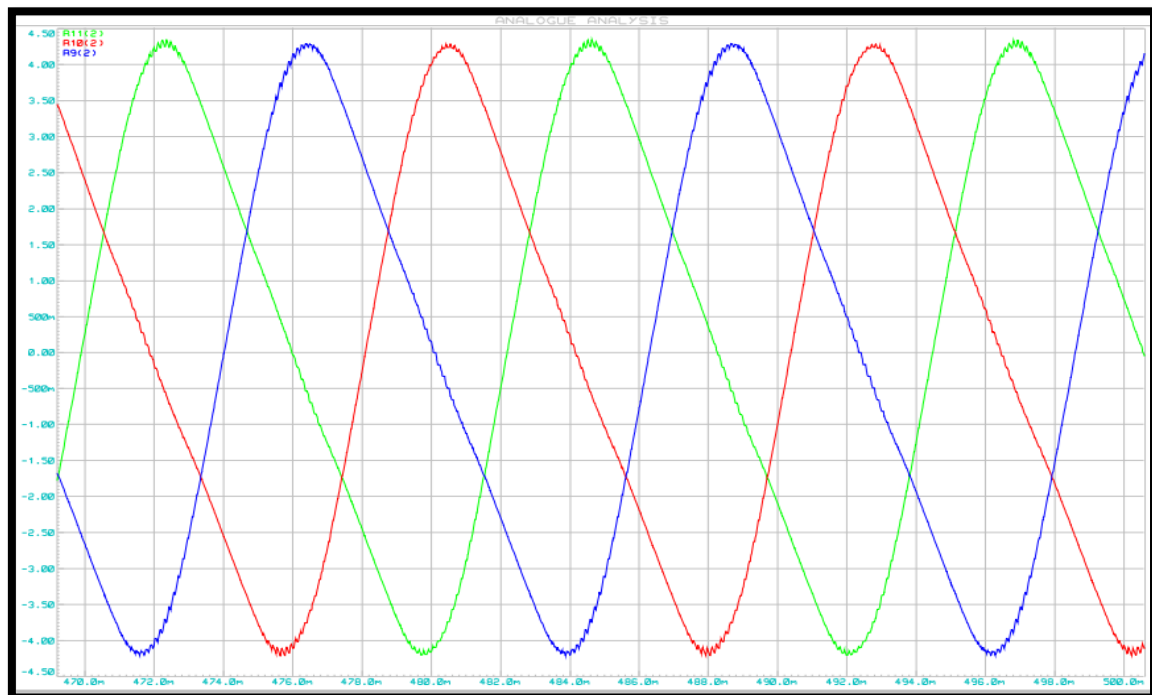
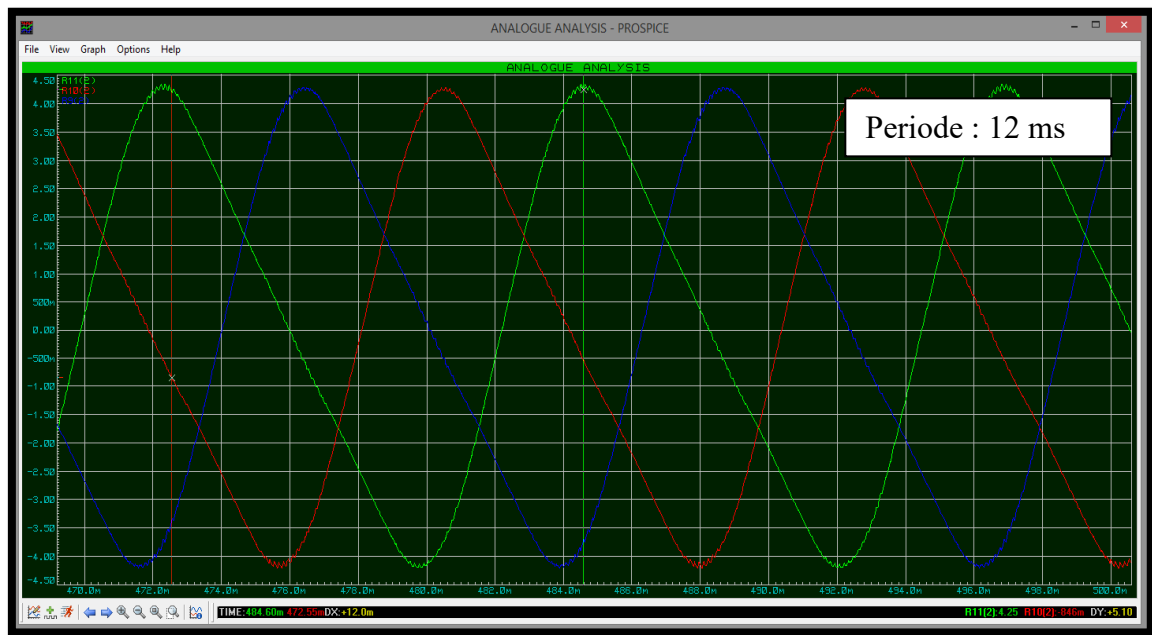


Figure 35. Spectres du courant statoriques du moteur à la fréquence 80 Hz.

g Fréquence $F=100$ Hz :

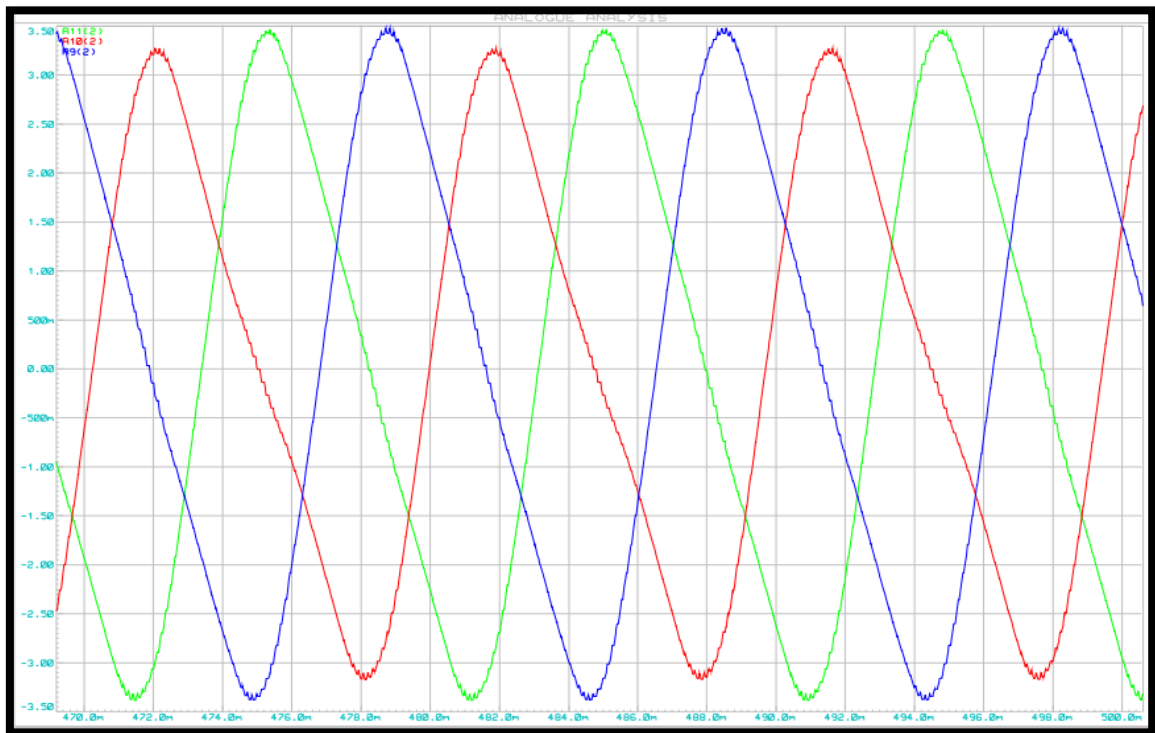
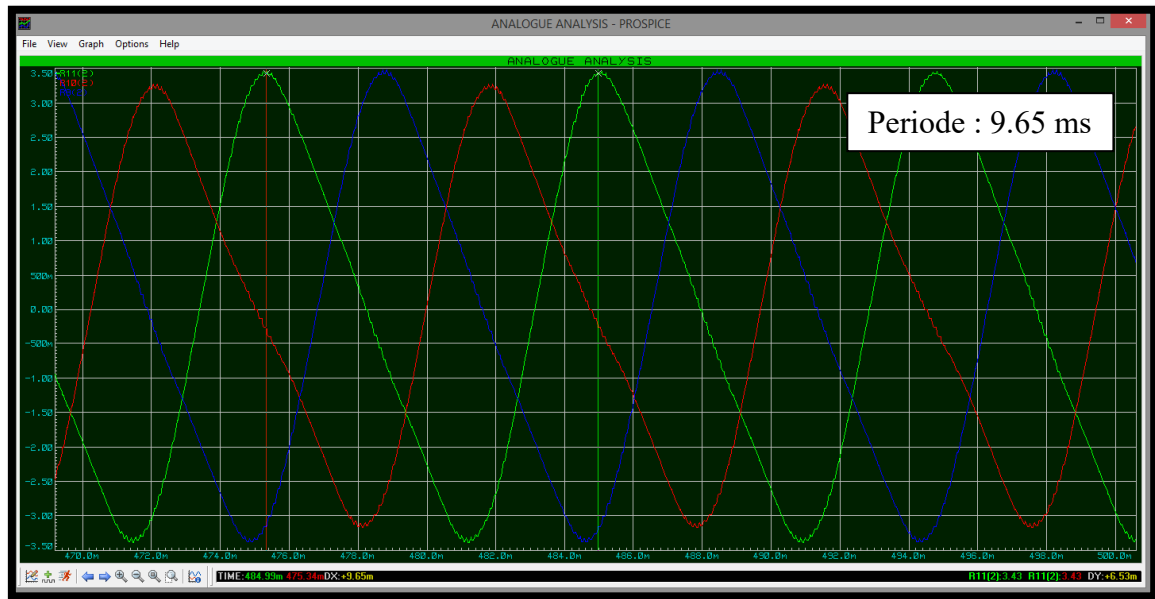


Figure 36. Spectres du courant statoriques du moteur à la fréquence 100 Hz.

III.6 Calculs théoriques

III.6.1 Calculs des impédances et courants :

Fréquence : $F = \frac{1}{T}$ avec T : la période en S.

l'impédance : $Z = \sqrt{(2\pi fL)^2 + R^2}$ avec $R=1\Omega$ et $L=0.1$ H

$I = \frac{E}{Z \cdot \sqrt{3}}$ avec $E=400$ Volts

Fréquence (Hz)	10	15	20	30	50	80	100
Impédance (Ω)	6.36	9.47	12.60	18.87	31.43	50.27	62.83
Courant (A)	36.31	24.38	18.32	12.23	7.34	4.59	3.67

Tableau 2. Calculs des impédances et courants

III.6.2 Comparaison entre simulation et théorie :

Fréquence théorique	10	15	20	30	50	80	100
Fréquence mesurée	10	15.10	20.36	30.76	50	83.33	103.62
Impédance théorique	6.36	9.47	12.60	18.87	31.43	50.27	62.83
Courant théorique	36.31	24.38	18.32	12.23	7.34	4.59	3.67
Courant mesurée	35	24	17.5	11.8	7	4.30	3.50

Tableau3. Calcul des résultats de simulation

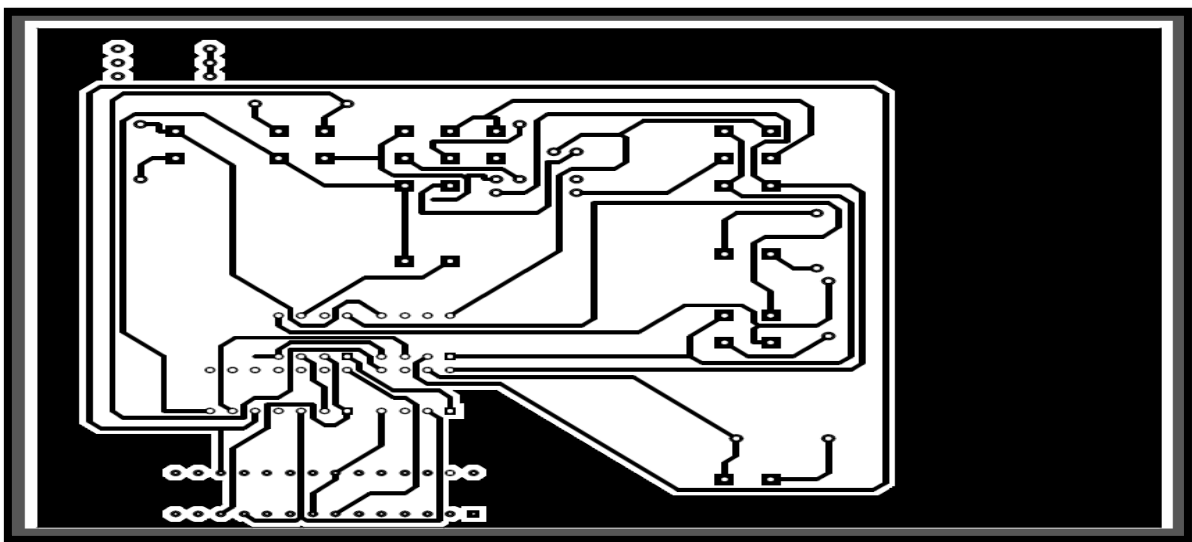
Après avoir obtenu les résultats de la simulation et les avoir comparés avec les résultats des calculs, nous concluons qu'en approximant les mêmes résultats avec eux, alors les résultats de la simulation sont corrects.

III.7 prototype

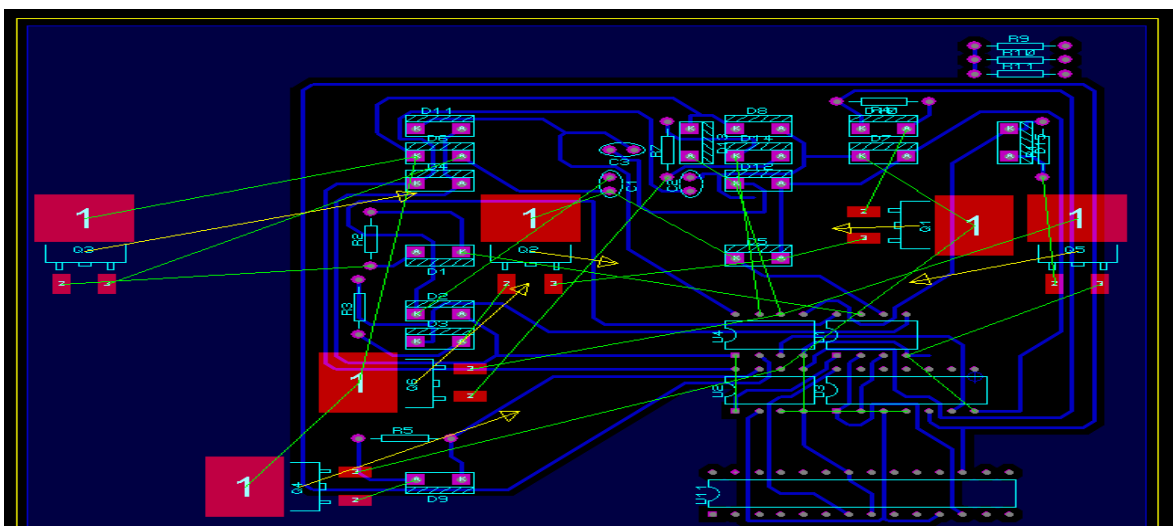
Nous terminons ce travail en donnant un modèle de réalisation pratique.

Cette partie fait intervenir le logiciel ARES de la suite de PROTEUS

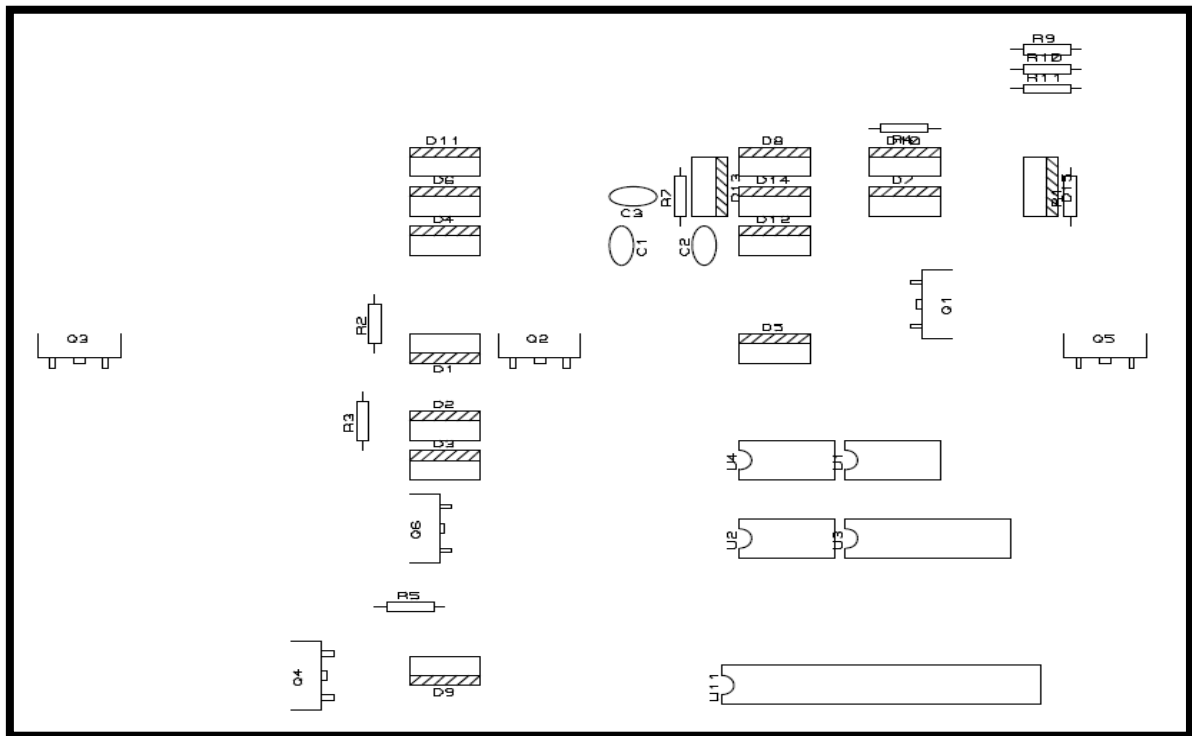
III.7.1 circuit imprimé



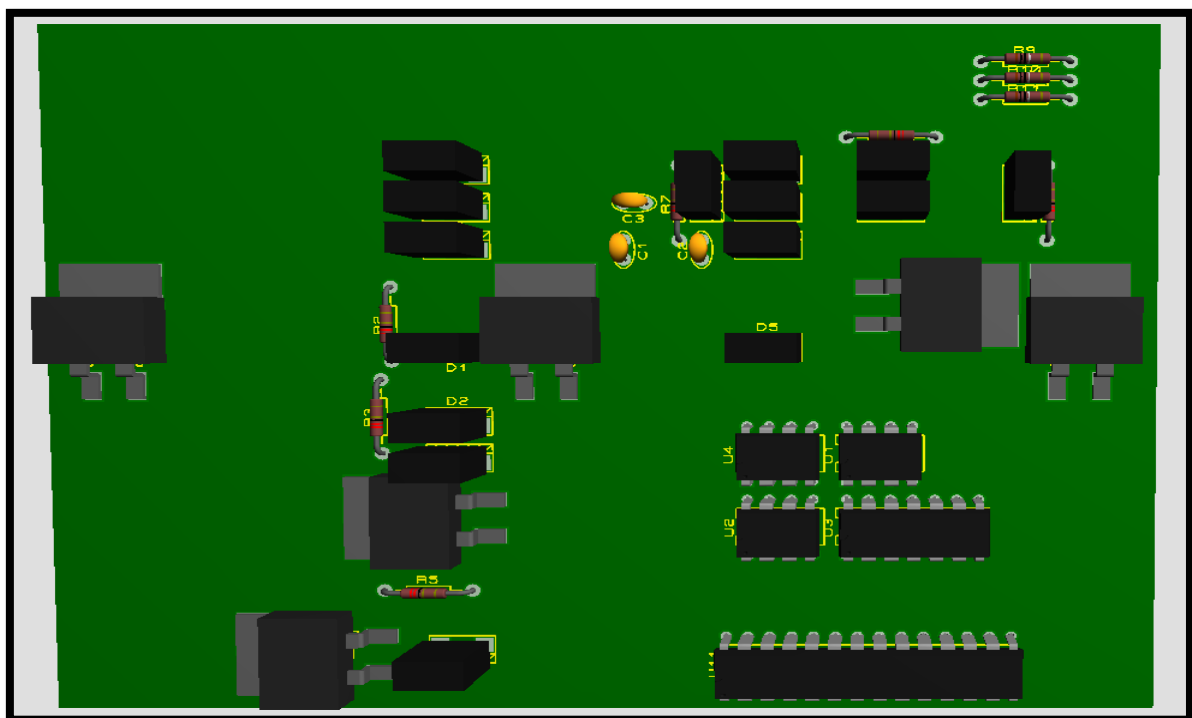
III.7.2 avant routage



III.7.3 implantation des composants



III.7.4 vue 3D



Conclusion.

Les variateurs de vitesse étant de plus en plus utilisés dans les procédés industriels, il est préférable de protéger les installations actuelles contre les perturbations électriques. Les outils pour assurer l'immunité sont de plus en plus disponibles et efficaces. Lors de l'acquisition de nouveaux variateurs de vitesse, il est fortement conseillé de les immuniser suffisamment pour assurer le bon fonctionnement de l'équipement en cas de perturbation électrique.

Bibliographie

- [1] <https://www.electro-technologie.com/2017/10/difference-entre-le-stator-et-le-rotor.html?m=1>
- [2] <https://fradown.com/fr/catalogue-moteur-asynchrone>
- [3] <https://www.technologuepro.com/cours-machines-electriques-mr/chapitre-5-machine-asynchrone.pdf/>
- [4] <http://m.fr.led-diode.com/info/igbt-definition-and-principle-34716916.html>
- [5] <https://www.astuces-pratiques.fr/electronique/redressement-triphas-double-alternance>
- [6] <https://www.microchip.com/en-us/product/ATmega328>
- [7] <https://www.locoduino.org/spip.php?article84>

Résumé

Ce mémoire donne une approche relative à la commande de vitesse d'un moteur asynchrone triphasé. Actuellement la commande numérique remplace la commande classique utilisée autrefois. Le travail que nous proposons se base sur l'utilisation d'un microcontrôleur très en vogue qu'est Atmega 328P.

Le travail exposé ici présente des résultats de simulation obtenus et la comparaison avec les calculs théoriques attendus.

ملخص

تقدم هذه الأطروحة نهجًا يتعلق بالتحكم في سرعة محرك غير متزامن ثلاثي الأطوار. يحل التحكم الرقمي حاليًا محل التحكم الكلاسيكي المستخدم في الماضي. يعتمد العمل الذي نقترحه على استخدام متحكم دقيق للغاية، وهو Atmega 328P. العمل المقدم هنا يعرض نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها والمقارنة مع الحسابات النظرية المتوقعة.

Summary

This thesis gives an approach relating to the speed control of a three-phase asynchronous motor. Currently the digital control replaces the classic control used in the past. The work we propose is based on the use of a very fashionable microcontroller, the Atmega 328P.

The work presented here presents simulation results obtained and the comparison with the expected theoretical calculations.