



Faculté des hydrocarbures et des énergies renouvelables et sciences de la terre et de l'univers

Département de Forage et mécanique des chantiers pétroliers

MEMOIRE
Pour obtenir un Diplôme Master

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Génie pétrolier

Spécialité : Mécanique des chantiers pétroliers

Présenté Par :

REMACHE Fares

-THEME-

**Etude du régime rationnel de fonctionnement d'une pompe
centrifuge avec vitesse variable par MLI**

Soutenue le : 21 / 06 / 2018 devant la commission d'examen

Jury :

Président : M. HACHANA Oussama

UKM OUARGLA

Rapporteur : M. KHENTOUT Abdelkader

UKM OUARGLA

Examineur : M. BENSACI Med Abdelatif

UKM OUARGLA

Dédicace

*Avec des sentiments purement pleins d'amour et de gratitude je dédie ce
modeste travail*

À ma petite famille et spécialement mon ange « Mohamed Iyed ».

*Pour ma grande famille, spécialement ma chère mère pour leurs prières,
sacrifices, patiences, tout au long de ma vie, mon cher père pour son aide
depuis mon enfance et dans mon carrière dès le début.*

Pour mes chers amis.

*À tous mes camarades de la promotion 2016-2018 Master Mécanique des
Chantiers pétroliers.*

*À tous qui ont contribué dans ma formation depuis mon enfance et pendant tous
les niveaux.*

À tous ceux que j'ai omis de citer...

Fares

Remerciements

Mes remerciements vont à dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donné durant toutes ces années d'étude

Je remercie infiniment monsieur KHENTOUT Abdelkader, pour l'honneur qu'il est fait en acceptant d'être l'encadreur du projet et pour sa consécration, sa présence, ses conseils et encouragements durant tout le temps alloué à mon projet dans le propos de bien mener ce travail avec tous le satisfecit souhaité.

Je souhaiterais remercier tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Nos respects aux membres de jury, qui me feront l'honneur d'accepter de jurer ce modeste travail d'apporter leurs réflexions leurs critiques scientifiques.

Merci encore à tous....

Sommaire

Dédicace

Remerciement

Introduction générale

Liste des figures

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les pompes

I.1.Introduction.....	2
I.2.Classification des pompes.....	2
I.2.1.Famille I : pompes volumétriques rotatives.....	3
I.2.2.1.Pompe à vis.....	3
I.2.2.2.Pompe à engrenages.....	4
I.2.2.3.Pompe à aubes appelées.....	5
I.2.2.1.Pompe à palettes.....	5
I.2.2.Famille II : pompes volumétriques alternatives.....	6
I.2.2.1.Pompe à membranes.....	6
I.2.2.2.Pompe à piston.....	7
I.2.3.Famille III : pompes roto-dynamiques.....	8
I.2.3.1.Classification des pompes roto-dynamiques.....	8
I.2.3.2.Avantages et inconvénients des pompes roto-dynamiques.....	10
I.3.Les pompes centrifuges.....	10
I.3.1.Utilisation.....	11
I.3.2.Fonctionnement.....	11
I.3.3.Théorie des pompes centrifuges.....	13
I.3.3.1.Critères généraux de définition des pompes.....	13
I.3.3.2. Types des pertes.....	13
I.3.3.3. Le rendement.....	14
I.3.3.4.La Hauteur manométrique totale de la pompe.....	15
I.4.Conclusion.....	16

Chapitre II : Les moteurs asynchrones

II.1.Introduction.....	17
II.2.Définition.....	17
II.3.Principe de fonctionnement et glissement.....	17
II.4.Composition d'une machine asynchrone.....	18
II.4.1.Machine asynchrone à pôles lisse.....	18
II.4.2.Machine asynchrone à pôles saillant.....	19
II.5.Différent types des machines asynchrone.....	19
II.5.1.Machine asynchrone à rotor bobiné.....	19
II.5.2.Machine asynchrone à cage.....	20
II.6.Choix de la vitesse des moteurs asynchrone.....	21
II.7.Bilan de puissance d'une machine asynchrone.....	22
II.8.Calcul des grandeurs électrique de la machines.....	23
II.9.Conclusion.....	24

Chapitre III : Les variateurs de vitesse

III.1.Introduction.....	25
III.2.Définition.....	25
III.3.Les redresseurs.....	26

III.4. Les onduleurs.....	28
III.5. Les gradateurs.....	28
III.6. Les hacheurs.....	28
III.6.1. Principe de fonctionnement.....	29
III.6.2. Le rapport cyclique α	29
III.7. Différents types d'hacheurs.....	29
III.7.1. Convertisseur Buck.....	29
III.7.2. Convertisseur Boost.....	32
III.8. Hacheur à quatre quadrants.....	32
III.9. Technique de commande MLI.....	34
III.10. Variateur de vitesse.....	36
III.11. Principes de base des variateurs de vitesse.....	36
III.12. Conclusion.....	37

Chapitre IV : Calcul & simulation

IV.1. Partie Calcul.....	38
IV.1.1. Introduction.....	38
IV.1.2. Choix de la pompe centrifuge.....	38
IV.1.3. Choix du moteur.....	41
IV.1.4. Réglage de débit.....	44
IV.1.5. Choix du variateur.....	46
IV.1.6. Application des lois de similitudes de NPSH, Débit, Hauteur.....	49
IV.2. Partie Simulation.....	52
IV.2.1. Introduction.....	52
IV.2.2. Résultat de simulation du système sans la variation de vitesse.....	52
IV.2.3. Résultat de simulation du système avec la variation de vitesse.....	56
IV.2.4. Conclusion.....	59

Conclusion générale

Bibliographie

Annexe

Résumé

Liste des figures

Figure. I-1 : Classification des pompes	2
Figure. I-2 : pompes volumétriques	3
Figure. I-3 : Pompe à vis	3
Figure. I-4 : Pompe à engrenage extérieur	4
Figure. I-5 : Pompe a engrenage intérieur	4
Figure. I-6 : Pompes à lobes	5
Figure. I 7 : Pompe a palette libre	5
Figure. I-8 : Pompe a palette flexible	6
Figure. I-9. Pompe à membranes	7
Figure. I-10 : Pompes à piston.	7
Figure. I-11 : Représentation des domaines respectifs des trois types de pompes roto-dynamiques	8
Figure. I-12 : Domaines d'utilisation des pompes industrielles roto-dynamiques	9
Figure. I-13 : Pompe centrifuge monocellulaire en porte à faux	9
Figure. I-14 : Pompe multicellulaire	10
Figure. I-15 : Dessin descriptif d'une pompe centrifuge mono étage.	11
Figure. I-16 : Types de roue	12
Figure. I-17 : Point de fonctionnement.	16
Figure. II-1 : Pompe centrifuge raccordée avec moteur asynchrone	17
Figure. II-2 : Machine asynchrone à pôles lisse	18
Figure. II-3 : machine asynchrone à pôles saillant	19
Figure. II-4 : Bilan de puissance	22
Figure. III-1 : Diagramme des divers types de convertisseurs statiques	25
Figure. III-2 : Convertisseurs alternatif-continu	26
Figure. III-3 : Redresseur commandé pont mixte symétrique	26
Figure. III-4 : La tension aux bornes de la charge avec un redresseur commande	27
Figure. III-5 : convertisseurs statiques continu-alternatif	28
Figure. III-6 : Gradateur	28
Figure. III-7 : Le fonctionnement d'un hacheur BUCK	29
Figure. III-8 : la tension aux bornes de la charge avec un hacheur série	30
Figure. III-9 : La valeur moyenne en fonction de rapport cyclique (α)	30
Figure. III-10 : Hacheur série commande un moteur à courant continu.	31
Figure. III-11 : Hacheur à quatre quadrants	32
Figure. III-12 : la tension aux bornes de la charge avec un hacheur quatre quadrants	33
Figure. III-13 : Principe du fonctionnement d'un Hacheur quatre quadrants.	34

Figure. III-14 : Réalisation du signal MLI	35
Figure. III-15 : Convertisseur statique généralement continu-alternatif	36
Figure. IV-1 : Fonctionnement en charge de la pompe proposé	39
Figure. IV-2 : courbe caractéristique de la pompe	40
Figure. IV-3 : courbe caractéristique de la conduite	41
Figure. IV-4 : les puissances de système	41
Figure. IV-5 : Bilan des puissances	42
Figure. IV-6 : courbes caractéristiques de la conduite (vanne de réglage)	45
Figure. IV-7 : courbes caractéristiques de la pompe (variation de la vitesse)	50
Figure. IV-8 : courbes caractéristiques de la pompe	51
Figure. IV-9 : courbe de la consommation	51
Figure. IV-10 : Débit de la pompe correspond à une vitesse de 1480 tr/min	52
Figure. IV-11 : vitesse de rotation et vitesse angulaire du moteur	53
Figure. IV-12 : Couple moteur et vitesse angulaire du moteur	53
Figure. IV-13 : Couple moteur dans le fonctionnement à vide et sous charge	54
Figure. IV-14 : Courants statoriques fonctionnement à vide et sous charge	54
Figure. IV-15 : Tension simple des 3 phases (fonctionnement sous charge)	55
Figure. IV-16 : La porteuse de la commande MLI pour notre système	56
Figure. IV-17 : Variation de vitesses de la pompe correspond à la variation de son débit	57
Figure. IV-18 : Couple du moteur qui fonctionne sous charge avec variation de vitesse	58
Figure. IV-19 : Courant statorique du moteur qui fonctionne sous charge avec variation de vitesse	58

Liste des tableaux

Tableau. IV-1 : $Q_0 = f(H_0)$	39
Tableau. IV-2 : $Q_1 = f(H_1)$	40
Tableau. IV-3 : Les données obtenues par le test de la pompe	44
Tableau. IV-4 : $Q_1 = f(H_1)$	44
Tableau. IV-5 : $Q_2 = f(H_2)$	45
Tableau. IV-6 : Test avec vanne	50
Tableau. IV-7 : Test avec variation de vitesse	50

Introduction Générale

La plupart des installations mettant en jeu des débits tels que les pompes, sont utilisées sans réguler la vitesse de ces moteurs. Le plus souvent, on se contente de modifier de manière conventionnelle le débit en agissant par étranglement ou en utilisant des vannes. Mais lorsque le débit n'est pas régulé en jouant sur la vitesse de rotation des moteurs. Une régulation de la vitesse des moteurs avec variateurs de fréquence permet d'économiser jusqu'à 70% d'énergie.

L'entraînement de pompes centrifuges à vitesses variables n'est pas une nouveauté, mais avec les progrès de l'électronique industrielle, cette technologie connaît un développement accru. En effet, il existe actuellement des variateurs électroniques qui présentent une bonne fiabilité et un rendement satisfaisant.

La vitesse variable permet d'adapter le régime de la pompe aux conditions hydrauliques de réseau et ceci souvent en maintenant le rendement maximale du groupe, mais il ne faut pas prendre de vue les contraintes liées à cet équipement : contraintes mécaniques, fluctuation de NPSH. En cours, il faut choisir un système de régulation de la vitesse adapté aux conditions d'exploitation.

L'objectif de ce travail est de voir la possibilité d'améliorer le rendement des pompes centrifuges. Nous pouvons atteindre ce but en changeant le régime d'entraînement du système moteur

Pour décrire notre travail, nous empruntons le plan suivant :

- Le premier chapitre comporte des généralités sur les pompes
- Le deuxième chapitre contient une vue générale pour les moteurs synchrone
- Le troisième chapitre présente des généralités sur les moteurs asynchrones
- Le quatrième chapitre des généralités sur les variateurs des vitesses
- Le cinquième et le dernier chapitre comporte deux parties : l'une pour les calculs et la deuxième simulation à l'aide de logiciel MATLAB/Simulink.
- Le mémoire ce termine par une conclusion générale et des références bibliographiques.

Généralités
sur
les pompes

I.1.Introduction :

On appelle pompe du nom italien « pompa » toutes machines hydrauliques qui servent à déplacer les liquides d'une région de basse pression vers une région à grande pression. Son fonctionnement consiste à produire une différence de pression entre la région d'aspiration et la région de refoulement au moyen de l'organe actif (piston, roue,...etc.) de la pompe. Du point de vue physique, la pompe transforme l'énergie mécanique en énergie hydraulique.

Les pompes autant que machines, sont les pièces maîtresses qui donnent la vie aux unités de pétrole et au gaz. Leur choix et leur installation doivent faire l'objet de soins tout particulier de la part des services d'études, de même leur entretien requiert une des spécialistes très qualifiées, afin qu'elles puissent assurer dans les meilleurs conditions un service continu pendant une longue durée. [11]

I.2.Classification des pompes :

Les pompes en général se partagent en trois grandes familles :

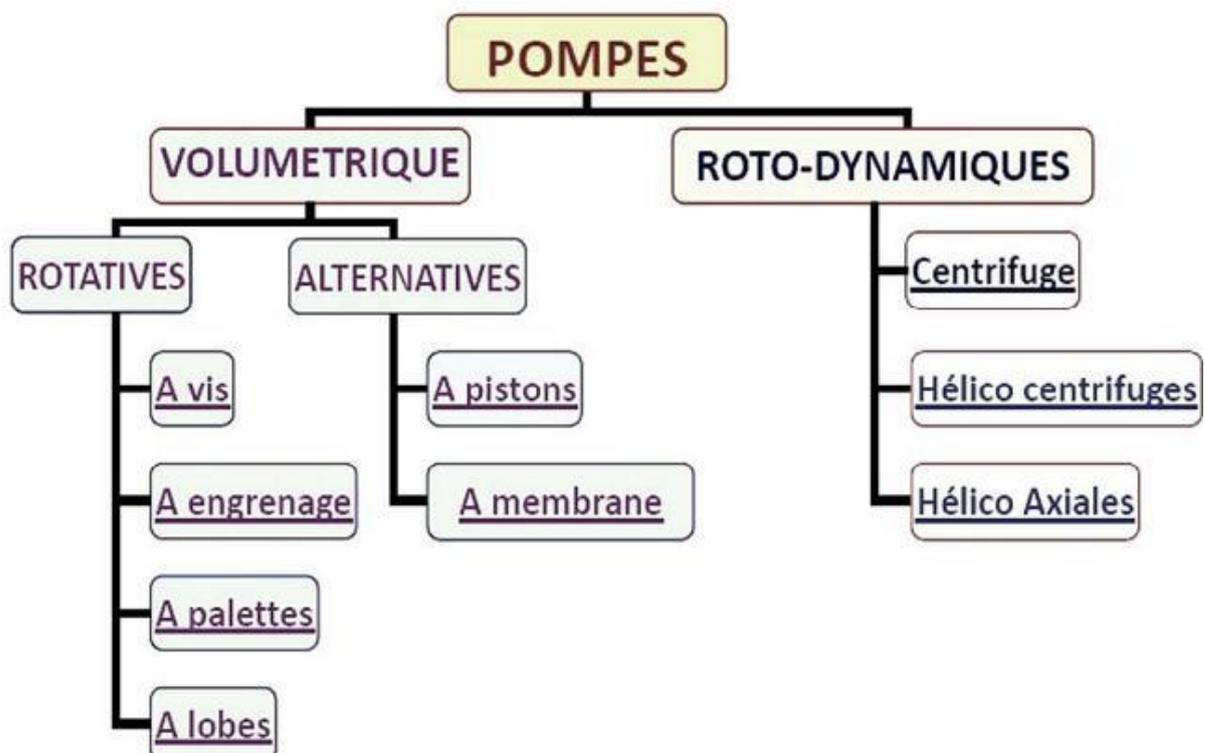


Figure. I-1 : Classification des pompes [12]

I.2.1.Famille I : pompes volumétriques à rotor tournant (rotatives) :

Le fluide se trouve enfermé dans un volume clos, mais mobile, qui va le transférer d'un état de pression 1 à un état de pression 2, avec modification du volume circulant entre le circuit d'aller et celui de retour. Les modes de réalisation sont très variés : pompes à engrenages, pompes à engrenages hélicoïdaux intérieurs, pompes à lobes, pompes péristaltiques, pompes à palettes, pompes à vis hélicoïdales,...etc. [13]



Pompe à engrenage



Pompe à palette

Figure. I-2 : pompes volumétriques

I.2.1.1.Pompe à Vis :

Une vis centrale motrice entraînant deux vis satellites. Elles ont un fonctionnement silencieux et un écoulement stable, et engendrent des pressions élevées. [13]

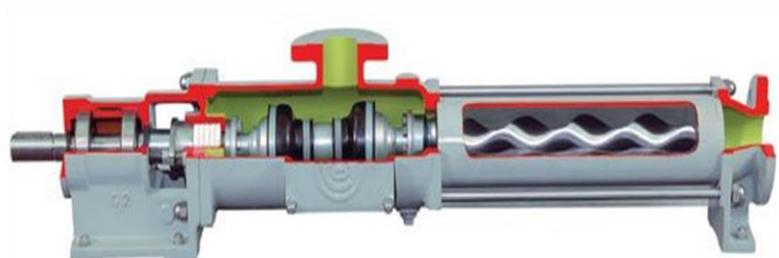
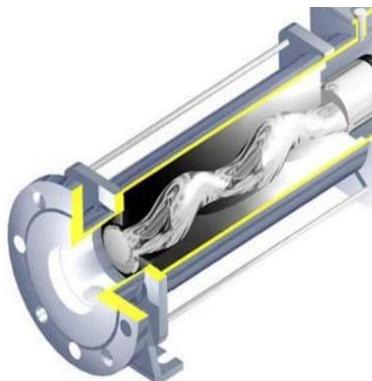


Figure. I-3 : Pompe à vis

I.2.1.2.Pompes à engrenages

I.2.1.2.1.Pompes à engrenages extérieurs :

Ce type de pompe comporte un grand nombre de variantes qui diffèrent entre elles soit par la disposition, soit par la forme des engrenages. Dans tous les cas, le principe consiste à aspirer le liquide dans l'espace compris entre deux dents consécutives et à le faire passer vers la section de refoulement. Les pompes à engrenages peuvent avoir une denture droite, hélicoïdale, ou encore à chevrons. Cette dernière solution présente l'avantage de rendre le mouvement plus uniforme. . [13]

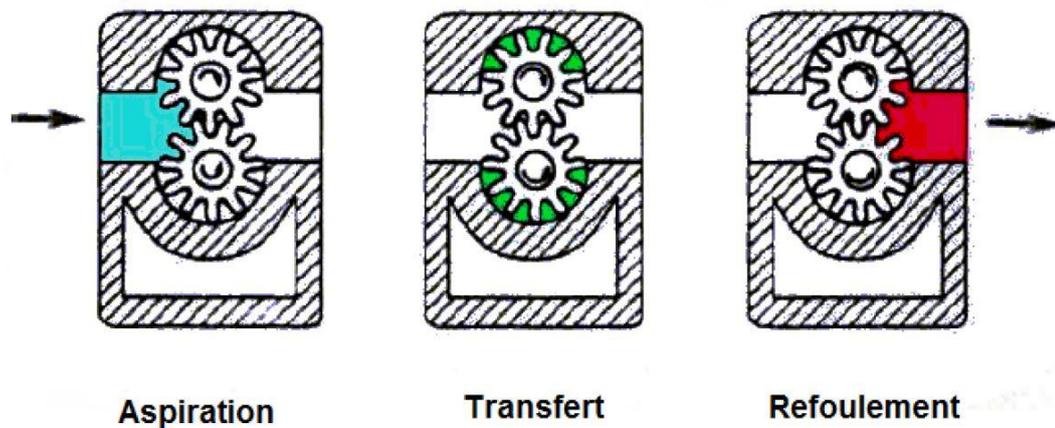


Figure. I-4 : Pompe à engrenage extérieur

I.2.1.2.2.Pompes à engrenages intérieurs :

Le principe général consiste à placer un des engrenages à l'intérieur de l'autre. Cette disposition nécessite l'utilisation d'une pièce supplémentaire en forme de croissant qui permet l'étanchéité entre les deux trains d'engrenages.

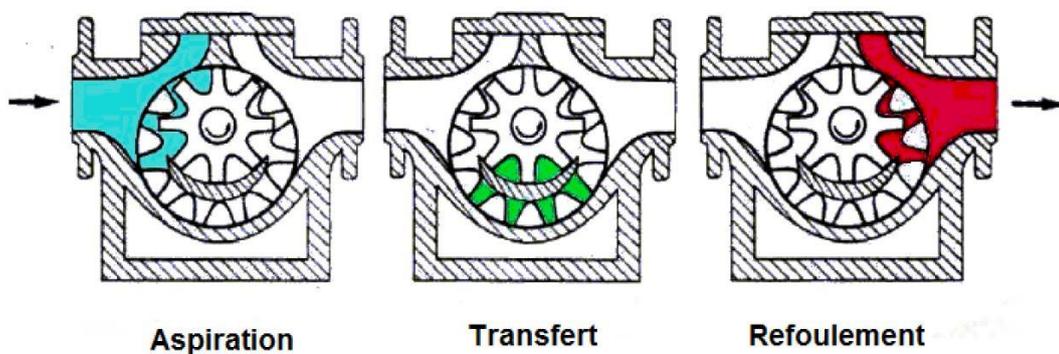


Figure. I-5 : Pompe à engrenage intérieur

I.2.1.3. Pompes à aubes appelées (communément rotors) :

Le principe reste le même que celui d'une pompe à engrenages externes classique à ceci près que les dents ont une forme bien spécifique et qu'il n'y a que deux ou trois dents (aubes) par engrenage. Les rotors ne sont jamais en contact et pour ce faire, sont entraînés par des engrenages externes. De ce fait, le pouvoir d'aspiration reste faible.



Figure. I-6 : Pompes à lobes

I.2.1.4. Pompes à palettes

I.2.1.4.1. Pompes à palettes libres :

Un corps cylindrique fixe communique avec les orifices d'aspiration et de refoulement. A l'intérieur se trouve un cylindre plein, le rotor, tangent intérieurement au corps de la pompe et dont l'axe est excentré par rapport à celui du corps. Le rotor est muni de 2 à 8 fentes diamétralement opposées deux à deux, dans lesquelles glissent des palettes que des ressorts appuient sur la paroi. Les capacités comprises entre les cylindres et les palettes en créant ainsi une aspiration du liquide d'un côté et un refoulement de l'autre.

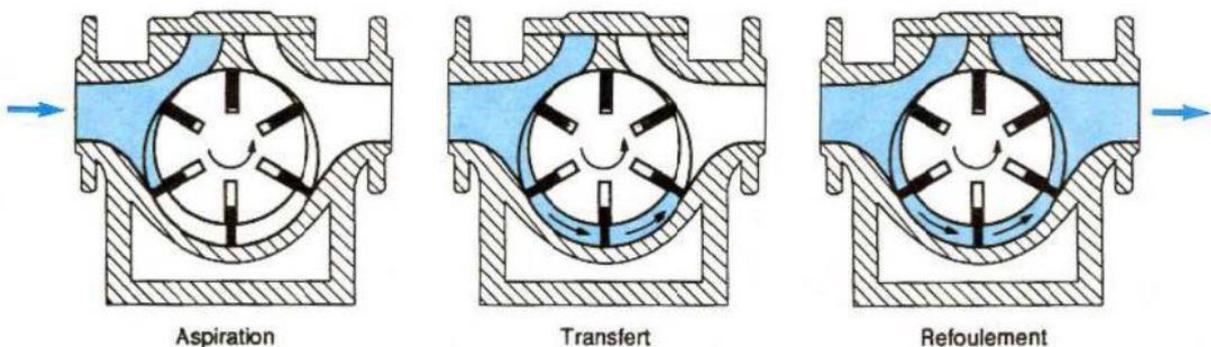


Figure. I-7 : Pompe à palette libre

I.2.1.4.2. Pompes à palettes flexibles :

L'ensemble rotor-palettes est en élastomère. Il entraîne le liquide jusqu'au refoulement où les palettes sont fléchies par la plaque de compression et permettent l'expulsion du liquide. Comme toutes les pompes à palettes, ces pompes n'entraînent ni brassage, ni laminage, ni émulsion du produit. Elles peuvent également pomper des particules solides.

Les caractéristiques, débit, vitesse, pression sont sensiblement identiques aux précédentes. . [13]



Figure. I-8 : Pompe a palette flexible

I.2.2.Famille II : pompes volumétriques alternatives (à pistons) :

Une pompe volumétrique alternative se compose aussi d'un corps de pompe parfaitement clos, à l'intérieur duquel se déplace un élément mobile rigoureusement ajusté ; mais la pièce mobile est animée d'un mouvement alternatif. Elles conviennent particulièrement bien pour des pressions élevées, et des débits faibles, généralement inférieurs à 100 m³/h, mais pouvant atteindre 200 m³/h.

I.2.2.1. Pompes à membranes, ou à soufflets :

Le déplacement du piston est remplacé par les déformations alternatives d'une membrane en matériau élastique (caoutchouc, élastomère, Néoprène, Viton, etc.). Ces déformations produisent les phases d'aspiration et de refoulement que l'on retrouve dans toute pompe alternative.

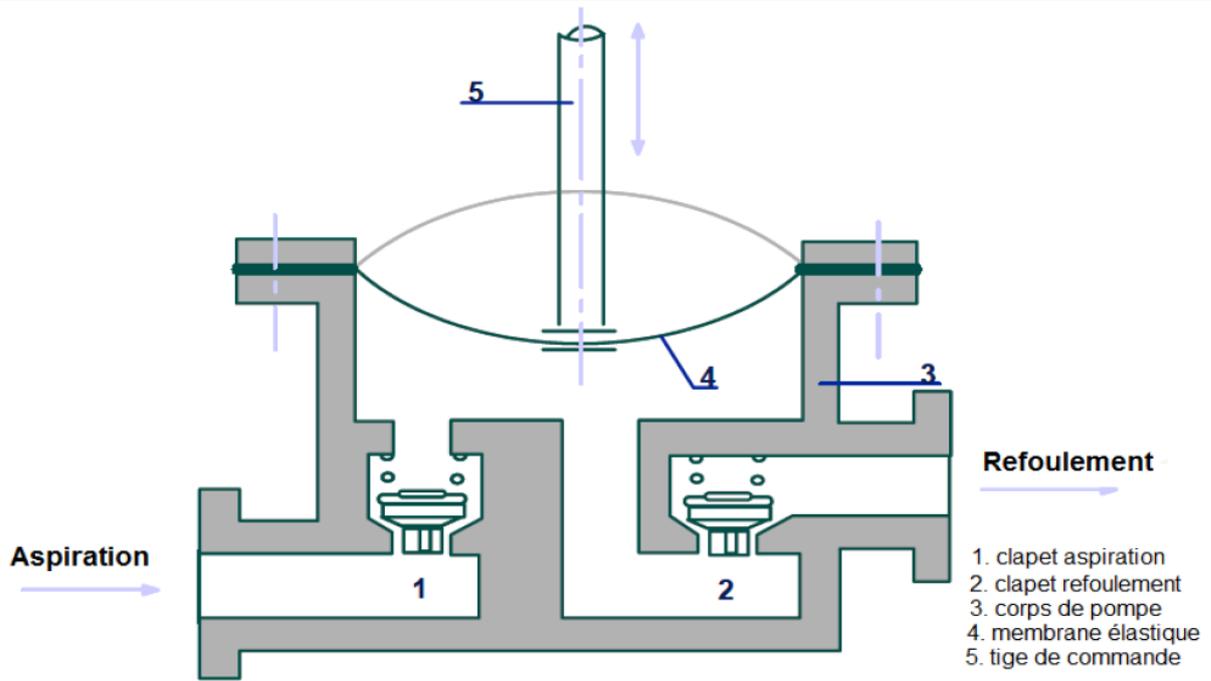


Figure. I-9 : Pompe à membranes

I.2.2.2.Pompes à piston :

Leur principe est d'utiliser les variations de volume occasionné par le déplacement d'un piston dans un cylindre. Ces déplacements alternativement dans un sens ou dans l'autre produisent des phases d'aspiration et de refoulement.

Quand le piston se déplace dans un sens le liquide est comprimé : il y a fermeture du clapet d'admission et ouverture du clapet de refoulement. Le fonctionnement est inverse lors de l'aspiration du liquide dans la pompe. [13]

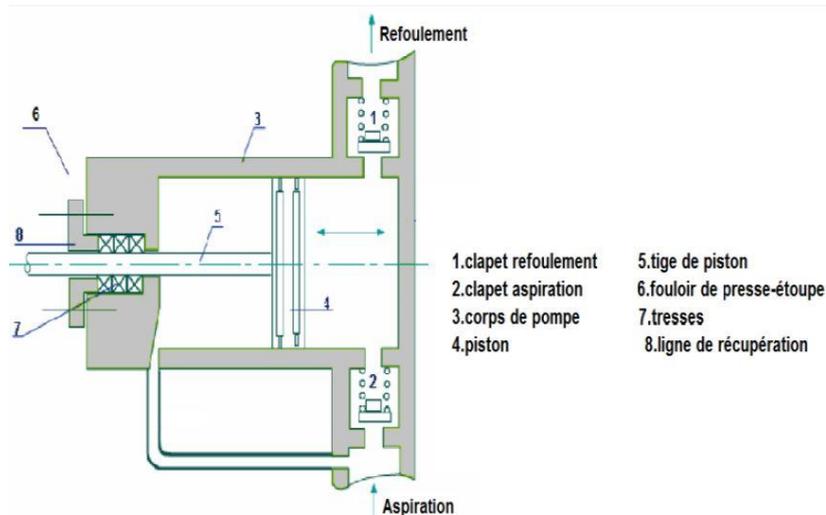


Figure. I-10 : Pompes à piston. [11]

I.2.3.Famille III : pompes roto-dynamiques :

On regroupe sous cette appellation les pompes centrifuges, hélico centrifuges et hélices. Cette famille peut être caractérisée par le fait que la pression y est générée soit par l'action des forces centrifuges, soit par la conversion en pression de l'énergie cinétique communiquée au fluide (en le ralentissant). Dans la pratique, ces deux modes de génération de pression sont associés, même pour une pompe hélice, lorsque l'on s'écarte du point nominal. Les pompes roto dynamiques constituent un système ouvert et en équilibre, où le fluide n'est jamais enfermé dans un volume totalement clos.

Cette famille de pompes est capable d'atteindre des débits Q très élevés, allant jusqu'à 105 m³/h. Encore convient-il de remarquer que cette limite n'est pas de caractère technologique, et que des débits sensiblement plus grands seraient réalisables.

I.2.3.1.Classification des pompes roto-dynamiques :

Dans la famille roto dynamiques, on classe les pompes :

- ❖ Selon la trajectoire du fluide (trajectoire de l'écoulement)
 - Les pompes centrifuges (à écoulement radial) ;
 - Les pompes hélico-centrifuges (à écoulement diagonal) ;
 - Les pompes axiales ou à hélices (à écoulement axiales).

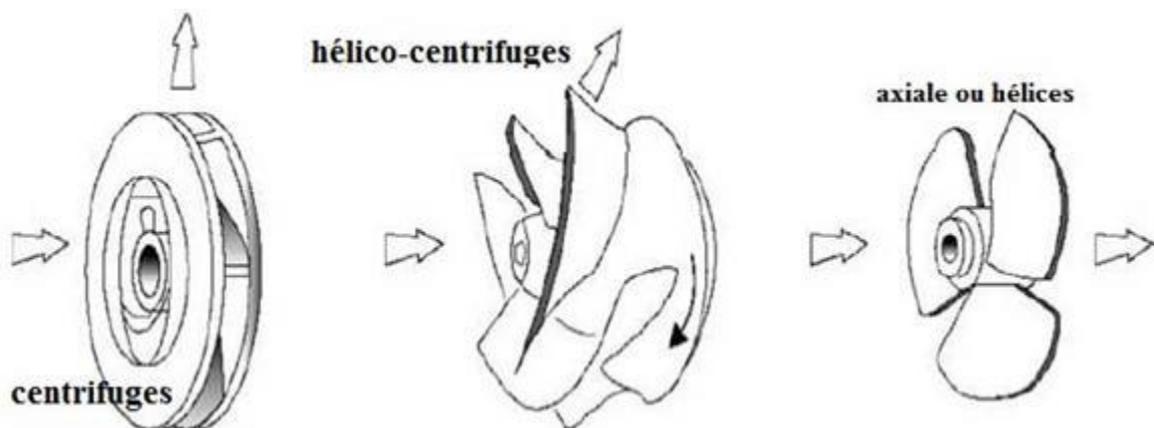


Figure. I-11 : Représentation des domaines respectifs des trois types de pompes roto-dynamiques. [13]

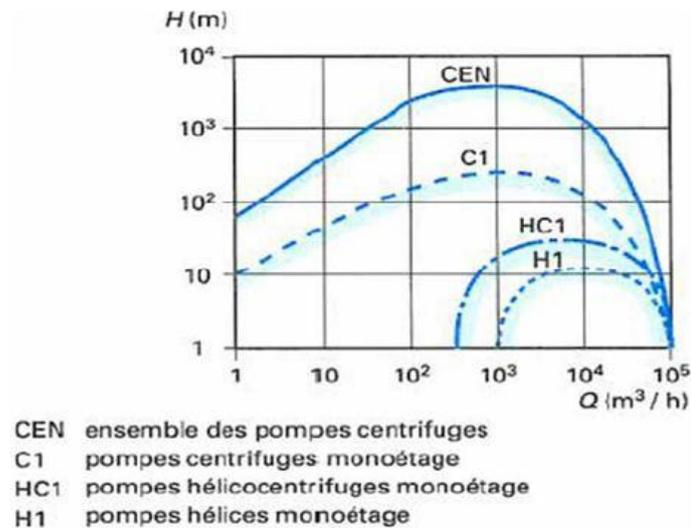


Figure. I-12 : Domaines d'utilisation des pompes industrielles roto-dynamiques. [13]

- ❖ Selon le nombre d'étages :
 - Monocellulaire : avec une seule roue (impulseur) sur l'arbre ;
 - Multicellulaire : avec plusieurs impulseurs sur l'arbre disposé en série.
- ❖ Selon la disposition de l'axe de la pompe :
 - Pompe vertical ;
 - Pompe horizontal.

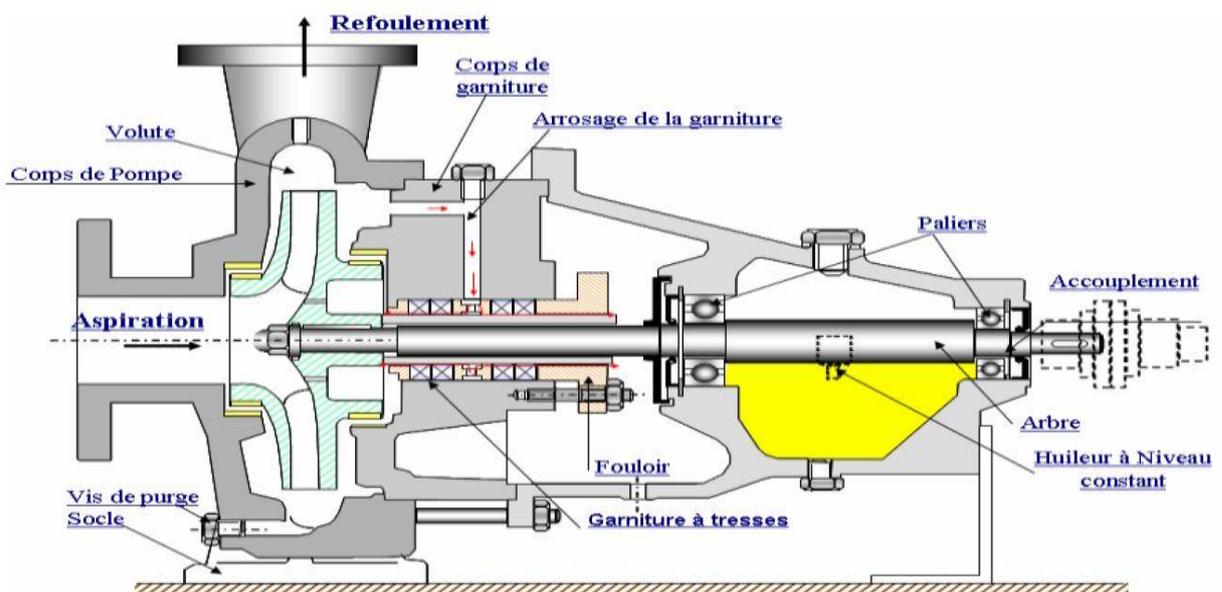


Figure. I-13 : Pompe centrifuge monocellulaire en porte à faux. [13]

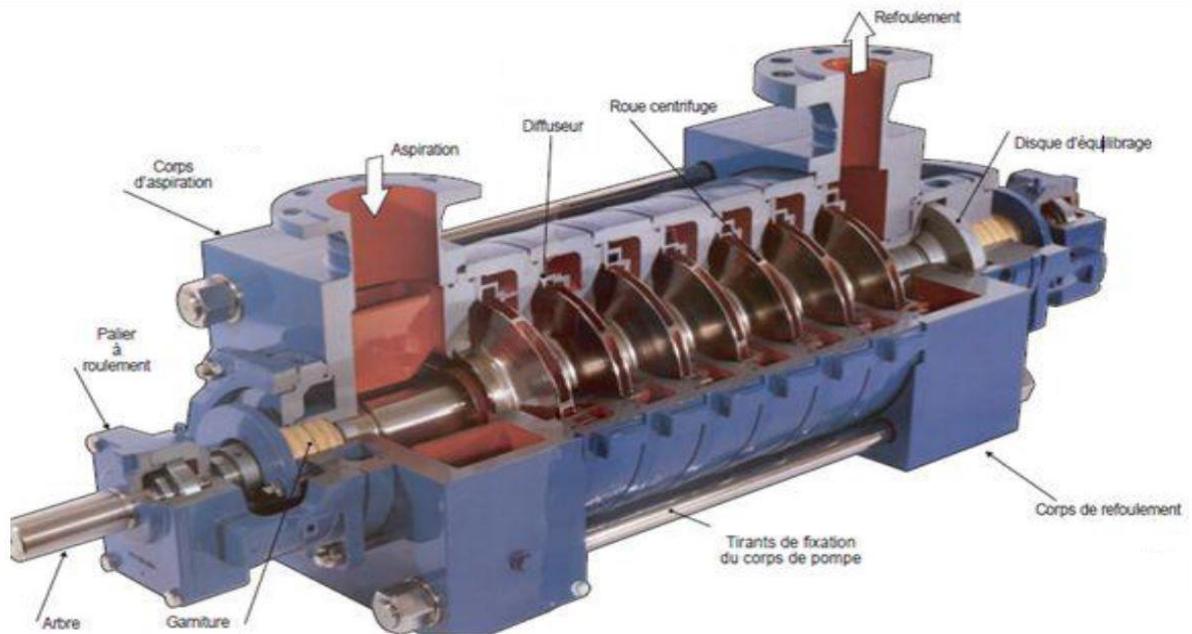


Figure. I-14 : Pompe multicellulaire. [13]

I.2.3.2. Avantages et inconvénients des pompes roto-dynamiques :

Concernant les avantages, ce sont des machines de construction simple, sans clapet ou soupape, d'utilisation facile et peu coûteuses :

- Leur rendement est souvent meilleur que celui des « volumétriques ».
- Elles sont adaptées à une très large gamme de liquide.
- Leur débit est régulier et le fonctionnement est silencieux.

Du côté des inconvénients :

- Impossibilité de pomper des liquides trop visqueux.
- Production d'une pression différentielle peu élevée (de 0,5 à 10 bar).
- Elles ne sont pas auto-amorçages
- À l'arrêt, ces pompes ne s'opposent pas à l'écoulement du liquide par gravité (donc, vannes à prévoir....).

I.3. Les pompes centrifuges :

Une pompe centrifuge est un système ouvert, en quelque sorte un trou ou encore un conduit, dans lequel est mis en place un champ de forces centrifuges. Elle n'est pas basée sur le transport du fluide dans un godet ou sur la variation dans le temps d'un volume d'emprisonnement, le fluide n'est plus poussé par une paroi matérielle, mais mis en mouvement et équilibré par un champ de forces. Cela est une notion très simple, « que nous allons le voir dans ce qui suit », elle est basée sur d'autres principes. La pompe centrifuge

fonctionne et s'utilise selon d'autres lois, qui sont l'objet de l'ensemble des paragraphes qui vont suivre. Nous y avons traité l'essentiel, cependant certains domaines restreints ou certains aspects particuliers n'ont pas été abordés.

I.3.1.Utilisation :

Les pompes centrifuges sont les plus utilisées dans le domaine industriel à cause de la large gamme d'utilisation qu'elles peuvent couvrir, de leur simplicité et de leur faible coût. Néanmoins, il existe des applications pour lesquelles elles ne conviennent pas, comme :

- Utilisation de liquides visqueux, la pompe centrifuge nécessaire serait énorme par rapport aux débits possibles.
- Utilisation de liquides "susceptibles" c'est-à-dire ne supportant pas la très forte agitation dans la pompe (liquides alimentaires tel que le lait).
- Utilisation comme pompe doseuse ; la nécessité de réaliser des dosages précis instantanés risque d'entraîner la pompe en dehors de ses caractéristiques optimales.

Ces types d'application nécessitent l'utilisation de pompes volumétriques. Par contre à la plupart des pompes volumétriques, les pompes centrifuges admettent les suspensions chargées de solides.

I.3.2.Fonctionnement :

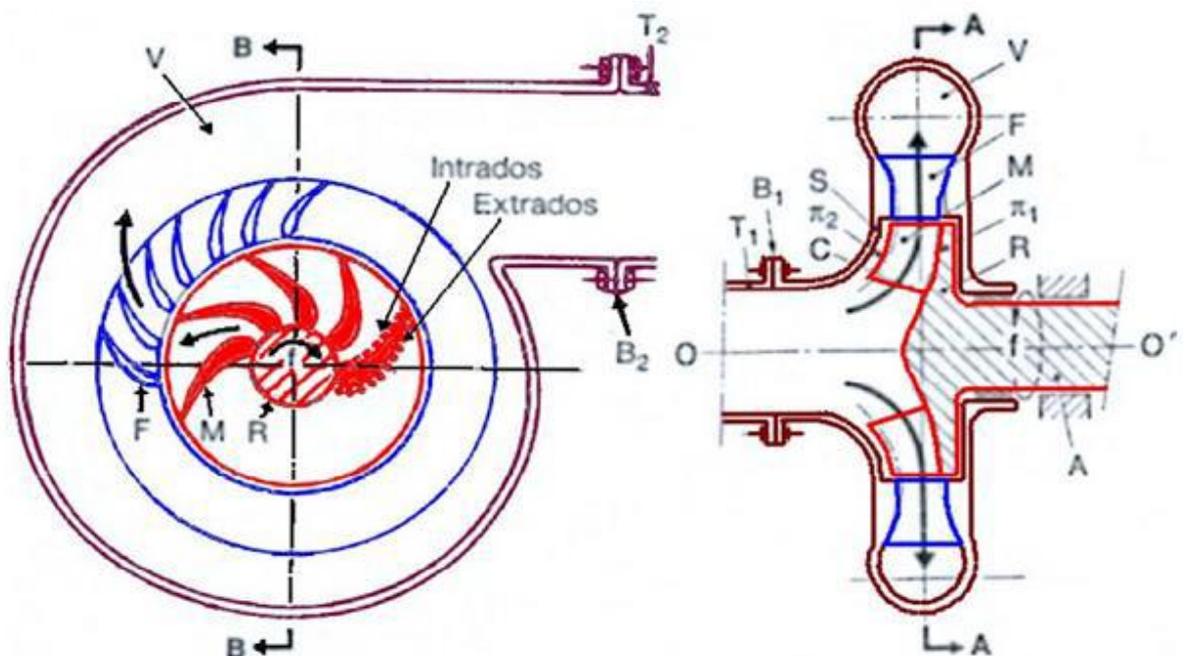


Figure. I-15 : Dessin descriptif d'une pompe centrifuge mono étage. [11]

À partir de la bride d'aspiration B1 dont la forme est circulaire, le fluide se répartit régulièrement vers la section d'entrée C des canaux mobiles qu'on appelle l'ouïe d'aspiration de la pompe. La quantité du fluide comprise entre B1 et C porte le nom de fond d'aspiration, elle représente le siège de l'écoulement permanent du fait du mouvement d'entraînement à vitesse angulaire constante.

Les aubes exercent des efforts de pression sur le fluide, qui se traduisent par l'existence d'une surpression le long de leur extrados et d'une dépression sur leur intrados. Le stator S de la pompe, encore appelé corps ou enveloppe, porte une couronne d'aubages fixes F appelée diffuseur à ailettes fixes qui présente aussi une symétrie par rapport à l'axe. L'espace compris entre deux aubages fixes constitue un canal fixe.

L'énergie reçue par le fluide pendant la traversée des canaux mobiles se manifeste par un accroissement, d'une part de sa pression et d'autre part de son énergie cinétique, une partie de cette énergie cinétique sera convertie en pression dans les aubages fixes à la sortie du diffuseur, le fluide doit être collecté et conduit vers la tuyauterie T2, cette dernière fonction est remplie par une capacité V qui s'enroule autour du diffuseur et qui doit à sa forme géométrique le nom de volute.

Dans une certaine mesure, cet espace est utilisé pour une transformation complémentaire de l'énergie cinétique en énergie de pression.

Les roues des pompes centrifuges sont très souvent fermées, constituées de deux flasques entretoisées par les aubes ; ces aubes peuvent être semi-ouvertes avec un seul flasque arrière ou encore ouvertes, sans flasque. Toutes ces roues centrifuges sont alimentées axialement par le liquide, après circulation dans les canaux, le liquide sort radialement par rapport à l'axe de rotation.

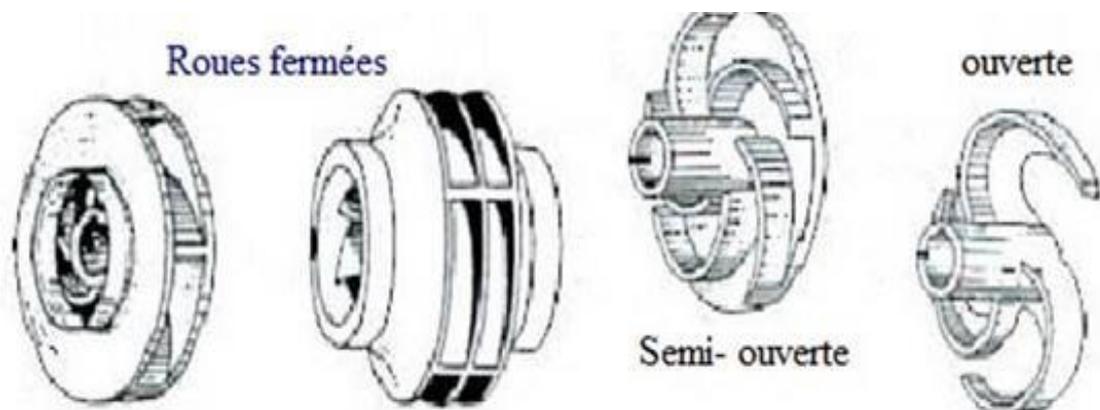


Figure. I-16 : Types de roue. [12]

I.3.3. Théorie des pompes centrifuges :

I.3.3.1. Critères généraux de définition des pompes :

Les critères les plus importants sont :

- **La vitesse de rotation n [tr/min] :** c'est le nombre de tours qu'effectue la pompe par unité de temps.

$$\omega = 2\pi \cdot n / 60 \text{ [rd/sec]}$$

- **Le débit Q [m³/s] :** C'est le volume qu'une pompe peut ou doit fournir par unités de temps.

$$Q = v \cdot S \text{ [m}^3\text{/s]}$$

- **La hauteur H [m] produite par la pompe :** cette hauteur est la différence entre la hauteur totale du liquide au refoulement (H_R) et la hauteur totale à l'aspiration (H_A).

$$H = H_R - H_A \text{ [m]}$$

- **La puissance utile est absorbée :** la puissance disponible au niveau de l'arbre d'entraînement de la roue de la pompe est la puissance absorbée de cette pompe. La puissance transmise au fluide est appelée puissance hydraulique utile.

$$Pu = \rho \cdot g \cdot H \cdot man \cdot Q$$

$$Pa = U \cdot I \cdot \cos \varphi$$

I.3.3.2. Types des pertes

Dans la pompe centrifuge :

a. Pertes mécaniques :

- ✓ Perte dans paliers radiaux.
- ✓ Perte dans paliers axiaux.
- ✓ Pertes d'accouplement.
- ✓ Pertes dans la garniture mécanique.

Pertes par frottement des surfaces immergées en rotation :

- ✓ Pertes par frottement de disque.
- ✓ Pertes par frottement sur un cylindre.

b. pertes par fuites :

- ✓ Fuite d'une garniture d'ouïe mono étage.
- ✓ Fuite dans une garniture d'ouïe bi étage.
- ✓ Fuite sur barrage arrière d'une roue équilibrée.

- ✓ Fuite au piston d'équilibrage.
- ✓ Fuite à l'extrémité des aubes.
- ✓ Fuite externes.

c. pertes hydrauliques :

Les pertes hydrauliques sont constituées par :

- ✓ Les pertes dans le conduit d'amenée.
- ✓ Les pertes dans les roues.
- ✓ Les pertes dans les diffuseurs lisses.
- ✓ Les pertes dans les canaux de retour.
- ✓ Les pertes dans la volute ; le diffuseur droit et le coude pour les pompes hélices.
- ✓ Les pertes des organes situés sur les conduits (pipe) entre les pompes et les puits injecteurs.

I.3.3.3. Le rendement :

Le rendement de la pompe c'est le rapport entre la puissance hydraulique (reçue par le liquide) et la puissance mécanique fournie à la pompe. Ce rendement varie en fonction du débit. Le constructeur est représenté le rendement de la pompe par une courbe sur l'arbre connaissant la puissance hydraulique.

Le meilleur rendement de la pompe détermine le débit nominal pour lequel correspondent la hauteur nominale et la puissance nominale.

Les rendements maximaux sont de l'ordre de :

- 70 % pour les pompes procédant à 3000 tr/min
- 80 % pour les pompes procédant à 1500 tr/min
- 80 % pour les pompes de forte puissance
- 50 à 60 % pour les petites pompes.

I.3.3.3.1. Rendement globale :

$$\eta_g = \frac{P_u}{P_a}$$

I.3.3.3.2. Rendement mécanique :

$$\eta_{mec} = \frac{P_i}{P_a}$$

P_i: Puissance interne= P_a - P_{mec}

P_{mec}: puissance mécanique

I.3.3.3. Rendement par frottement interne :

$$\eta_{fi} = \frac{P_i - P_f}{P_i}$$

P_f : puissance par frottement sur disque et sur cylindre

I.3.3.4. La Hauteur manométrique totale de la pompe :

Elle représente l'énergie fournie par la pompe au fluide. Le bilan d'énergie Appliqué entre les sections A et R (surfaces libres dans les 2 réservoirs d'aspiration et de refoulement) peut s'écrire en deux étapes ;

1. Tronçon de conduite amont : du point A au point 1 (entrée de la pompe)

$$H_A = H_1 + \Delta H_{A1}$$

2. Tronçon de conduite aval : du point 2 (sortie de la pompe)

$$H_2 = H_R + \Delta H_{2R}$$

$$(H_2 - H_1) = (Z_R - Z_A) + \frac{P_R - P_A}{\rho g} + \frac{V_R^2 - V_A^2}{2g} + \Delta H_{A1} + \Delta H_{2R}$$

Avec : $\frac{V_R^2 - V_A^2}{2g}$ Négligeable

I.3.3.4.1. Formule pratique d'utilisation :

$$H_{mt} = \frac{P_R - P_A}{d} + H_0 + \Delta H$$

Avec P_R et P_A sont exprimées en bar, et d la densité du liquide à la température

D'opération cette égalité reprisant le point d'intersection appelé :

Le point de fonctionnement (entre les deux courbes) ;

Courbe caractéristique de la pompe ; $H_{mt}(Q_v)$.

Courbe caractéristique de l'installation ; $Y(Q_v)$.

I.3.3.4.2. La limitation de la hauteur manométrique d'aspiration -N.P.S.H. :

La cavitation est la vaporisation du liquide contenu dans la pompe quand il est soumis à une pression inférieure à la tension de vapeur correspondant à sa température. Ce phénomène se produit à l'orifice d'aspiration de la pompe, des bulles apparaissent dans les zones où la pression est la plus faible (entrée des aubes de roue des pompes centrifuges). Elles sont transportées dans les zones de pressions plus fortes où se produit leur décondensation. Des implosions se produisent alors à des fréquences élevées et créent des surpressions locales très

élevées (jusqu'à des centaines de bars) [1], Le *N.P.S.H.* est une caractéristique, donnée par le constructeur est qualifiée de « *NPSH requis* ». Elle tient compte en particulier de la chute de pression que subit le fluide lors de son accélération à l'entrée de la roue. On appelle, par ailleurs, « *NPSH Disponible* » la différence entre la pression totale à l'entrée de la pompe au niveau de la bride en absolu et la pression de vapeur pour la température du fluide:

$$NPSH \text{ disponible} = \frac{1}{\rho g} (P_{\text{bride abs}} - P_v)$$

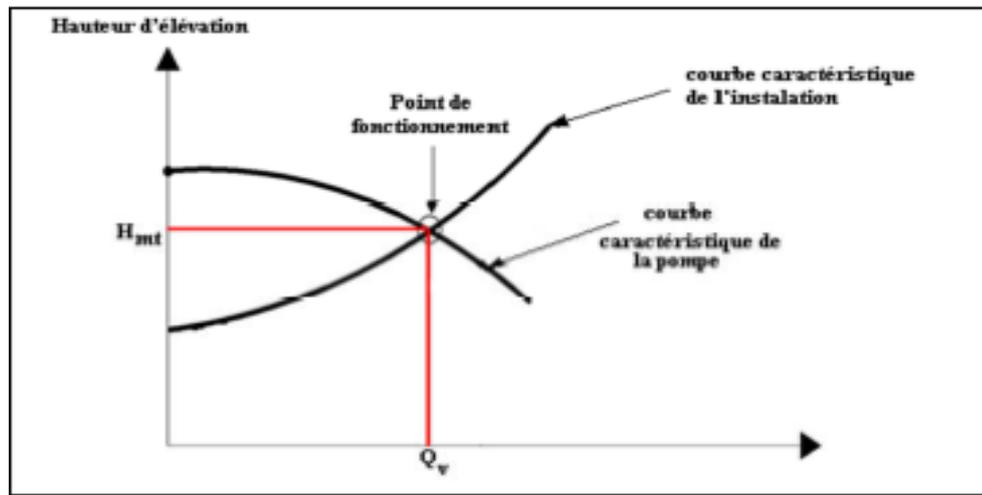


Figure. I-17 : Point de fonctionnement. [13]

I.4.Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons donné une brève définition sur les pompes, puis nous avons cité les différents types de cette dernière. Ensuite, nous avons développé la partie essentielle dans notre travail, la pompe centrifuge.

Nous avons également projeté la lumière sur le principe de fonctionnement et les caractéristiques des pompes centrifuges.

Les moteurs asynchrones

II.1.Introduction :

La pompe centrifuge ne peut pas fonctionner sans moteur (mécanique ou électrique) qui tourne leur arbre ; donner un couple utile pour faire tourner l'arbre d'aspiration. Dans ce cas en va raccorder notre pompe avec un moteur électrique appelée « moteur asynchrone ».

II.2.Définition :

On appelle machine asynchrone (MAS), une machine électrique de vitesse variable, à courant alternatif, qui à deux enroulements dont un seul (statorique) est alimenté par un réseau électrique de pulsation ω_s ; alors que le deuxième (rotorique) est fermé sur lui-même (ou à cage d'Eurielle) , généralement ce type de machines est plus utilisée on moteur asynchrone (en triphasé).[1]

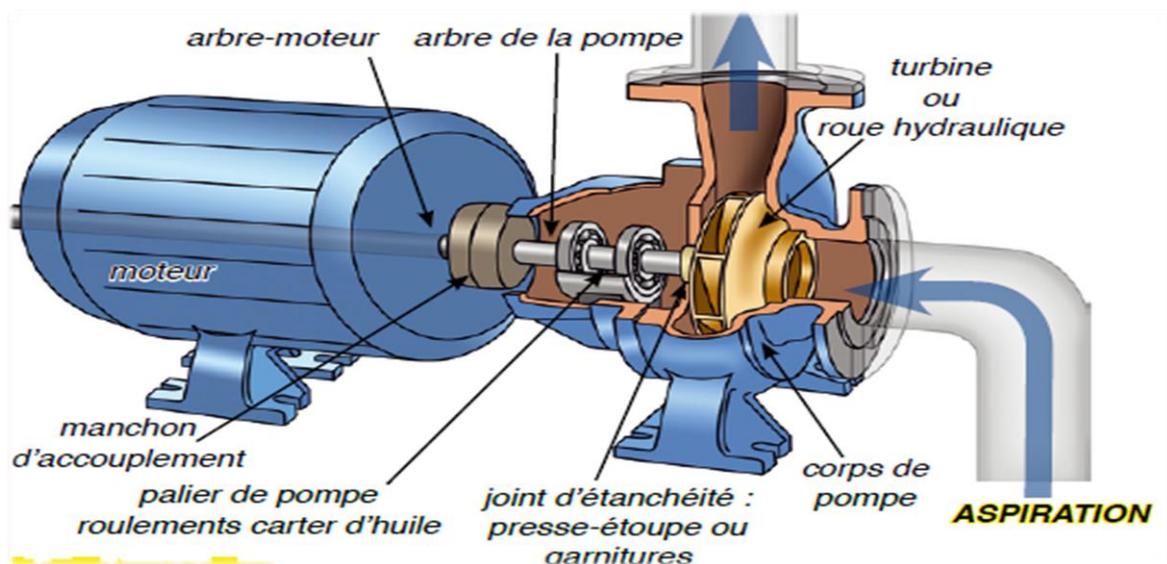


Figure. II-1 : Pompe centrifuge raccordée avec moteur asynchrone.

II.3.Principe de fonctionnement et glissement :

Un moteur asynchrone est un moteur possédant strictement le même stator qu'un moteur synchrone .Un ensemble de trois bobinages parcourus par des courants triphasés induisent un champ tournant statorique de vitesse de rotation en tours par minute

$$N_s = 60 \frac{f}{p}$$

Etant le nombre de paires de pôles du bobinage .La différence notable avec le moteur synchrone réside dans le rotor.

Celui-ci est constitué de conducteurs (des bobinages ou carrément des barres métalliques) disposés le long du rotor et court-circuités. Lorsque le champ tournant balaye ces conducteurs, il induit des courants qui entrent en interaction avec le champ et permettant à un couple moteur de se créer.

Le rotor se met alors à tourner et se stabilise à une vitesse toujours légèrement inférieure à la vitesse de synchronisme. Il est impossible pour le rotor de tourner à la vitesse de synchronisme puisqu'il serait alors baigné dans un champ fixe, et donc parcouru par un courant nul. En l'absence de courant, le couple serait nul, et la machine décélérerait. La légère différence de vitesse justifie le terme de « glissement » du rotor par rapport au champ tournant.

II.4.Composition d'une machine asynchrone :

Toutes les machines électrique dynamique sont constituées de deux parties :

- 1- **Stator** : la partie fixe de la machine
- 2- **Rotor** : la partie mobile de la machine

II.4.1.Machine asynchrone à pôles lisse :(P=2 ou 1 ; turboalternateur) :

Ce mode de construction qui assure une grande robustesse mécanique est systématiquement adopté pour les alternateurs de fortes puissances (de 50 à 1500 MW) dont la fréquence de rotation est élevée (3000 et 1500 tr/min). Le turboalternateur est utilisé pour la production d'énergie électrique dans les centrales thermiques ou nucléaires.

Ex : pour avoir $F= 50 \text{ Hz}$:

- Hydro alternateur (P=40) à 75 tr/min
- Turbo alternateur (P=2) à 1500 tr/min

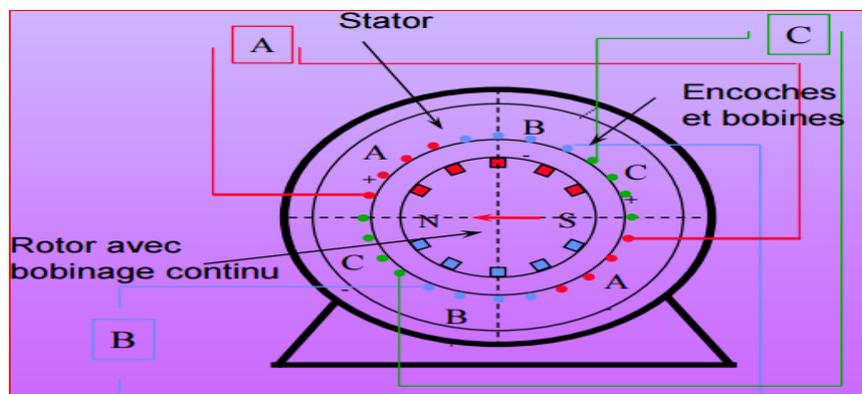


Figure. II-2 : Machine asynchrone à pôles lisse.

II.4.2. Machine asynchrone à pôles saillant :

Ce type de construction n'autorise pas de grandes vitesses de rotation (forte puissance mais faible vitesse $n < 1500$ tr/min). La puissance d'un alternateur à pôles saillants ($p \gg 1$) va de quelques kilovolts ampères à 250.000 KVA. Il est principalement utilisé, dans les groupes électrogènes et dans les centrales hydrauliques (barrages), pour la production d'énergie électrique du réseau national.

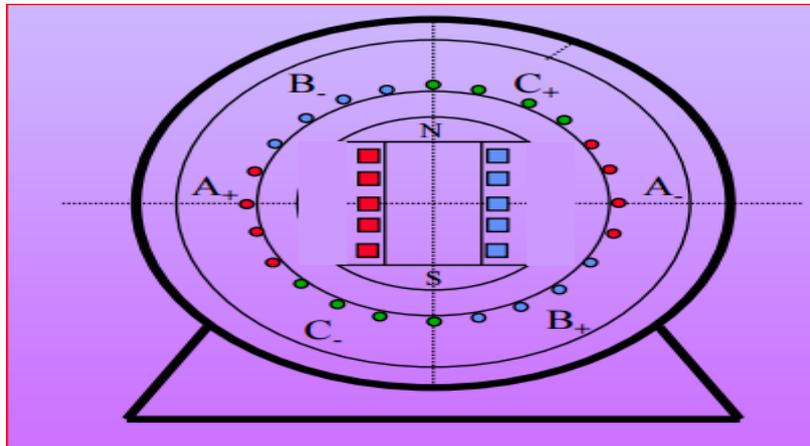


Figure. II-3 : machine asynchrone à pôles saillant.

II.5. Différent types des machines asynchrone :

Il y'a plusieurs types de machine asynchrone et on va voir les types, les plus utilisés :

II.5.1. Machine asynchrone à rotor bobiné :

Le rotor comporte un enroulement bobiné à l'intérieur d'un circuit magnétique constitué de disque en tôle empilés sur l'arbre de la machine. Ce enroulement est obligatoirement polyphasé, même si le moteur est monophasé, et, en pratique, toujours triphasé à couplage en étoile. Les encoches, découpées dans les tôle sont légèrement inclinées par rapport à l'axe de la machine de façon à réduire les variation de réluctance liées à la position angulaire rotor \ stator et certaines pertes dues aux harmoniques.

Les extrémités des enroulements rotorique sont sorties et reliées à des bagues montées sur l'arbre, sur lesquelles frottent des balais en carbone. On peut ainsi mettre en série avec le circuit rotorique des éléments de circuit complémentaires (résistance, électronique de puissance ...) qui permettent des réglages de la caractéristique couple \ vitesse. Ce type de moteur est utilisé essentiellement dans des applications où les démarrages sont difficiles et \ou nombreux ; en effet les pertes rotor pendant la phase de démarrage valant approximativement $\frac{1}{2} Jw^2$ ne sont pas toujours supportées par les cages.

II.5.2. Machine asynchrone à cage :

Le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrémités, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil. Bien entendu, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui du moteur à rotor bobiné.

Les barres sont faites en cuivre, en bronze ou en aluminium, suivant les caractéristiques mécaniques et électriques recherchées par le constructeur. Dans certaines constructions, notamment pour des moteurs à basse tension (par exemple 230/400 V), la cage est réalisée par coulée et centrifugation d'aluminium.

On démontre que, si le nombre de barres est suffisamment grand (soit pratique, $N_b \geq xp$), la cage se transforme automatiquement en un circuit polyphasé de polarité adéquate. Ce type de moteur, beaucoup plus aisé à construire que le moteur à rotor bobiné est par conséquent d'un prix de revient inférieur et a une robustesse intrinsèquement plus grande. Il n'est donc pas étonnant qu'il constitue la plus grande partie du parc des moteurs asynchrones actuellement en service.

Son inconvénient majeur est qu'il a, au démarrage, de mauvaises performances (courant élevé et faible couple). C'est pour remédier à cette situation qu'ont été développés deux autres types de cage (rotor à double cage et rotor à encoches profondes).[3]

- **Rotor à double cage**

Le rotor comporte deux cages coaxiales, l'une (fréquemment réalisée en laiton ou en bronze) externe à résistance relativement élevée, est placée près de l'entrefer, l'autre (en cuivre) interne de plus faible résistance, est noyée dans le fer.

Au démarrage, le courant rotorique, de fréquence égale à la fréquence f du réseau d'alimentation, se situe essentiellement dans la cage externe, du fait de la faible pénétration du courant dans l'épaisseur du rotor (effet de peau). Sa relativement forte résistance réduit l'appel de courant et accroît le couple de démarrage. Au contraire, lorsque le moteur atteint son régime nominal de fonctionnement, normalement caractérisé par un faible glissement g donc une fréquence rotorique basse, la cage interne de faible résistance est parcourue par la presque totalité du courant rotorique ce qui réduit le glissement donc les pertes rotoriques. On peut ainsi, obtenir des couples de démarrage C_d de deux à trois fois supérieurs à ceux du rotor à simple cage sans trop augmenter le glissement nominale.

- **Rotor à encoches profondes**

Le rotor à double cage est beaucoup plus difficile à construire que le rotor à simple cage et est donc d'un coût plus élevé. On peut pallier cet inconvénient, tout en gardant une

partie de ses avantages, en construisant une cage rotorique simple avec des barres très plates s'enfonçant profondément dans le circuit magnétique.

Lors de démarrage, les lignes de courant se concentrent près de la périphérie et tendent ainsi à assigner une section de conducteur apparente réduite et par conséquent une résistance rotorique importante.

En revanche, en marche normale, cet effet disparaît et les lignes de courant, en occupant la pleine section de la barre, retrouvent un circuit de faible résistance.

Ce type de moteur, dit à encoches profondes, est très utilisé, notamment dans le cas des moteurs à haute tension à fort couple de démarrage. Il présente cependant l'inconvénient de dispersion des enroulements, donc une diminution du facteur de puissance du moteur, et bien sûr, d'exiger un diamètre de rotor plus important. Pour remédier à ce dernier inconvénient, on a parfois fait appel à des conducteurs ayant des formes plus compliquées, en trapèze, voire en L (la base de L étant en fond d'encoche).

II.6.Choix de la vitesse des moteurs asynchrone :

Le choix de la vitesse des moteurs asynchrones est limité du fait que la vitesse synchrone est déterminée uniquement par la fréquence du réseau et par le nombre de pôles de la machine. Ainsi que, lorsque la source d'alimentation est de 60 Hz, il est impossible de construire un moteur asynchrone ayant un rendement acceptable et dont la vitesse serait, disons, de 2000 tr/min. Un tel moteur aurait nécessairement deux pôles, mais comme la vitesse synchrone est alors de 3600 tr/min, il s'ensuit que le glissement serait $(3600 - 2000)/3600 = 0,44$. Cela implique que 44% de la puissance fournie au rotor serait dissipée sous forme de chaleur, donnant ainsi un très mauvais rendement.

Pour une application particulière, le choix de la vitesse du moteur est fixé par la nature de la charge à entraîner. Dans le cas de charges devant tourner à basse vitesse, il est souvent plus avantageux d'utiliser un moteur à haute vitesse avec un réducteur de vitesse (engrange, poulie) au lieu d'un moteur à basse vitesse accouplé directement à la charge. Les avantages d'un moteur équipé avec une boîte vitesse sont les suivants :

1. Pour une donnée, l'encombrement et le coût d'un moteur à haute vitesse sont plus petits que pour un moteur à basse vitesse ;
2. Le rendement et le facteur de puissance des moteurs asynchrones sont d'autant plus hauts que la vitesse est plus haute ;
3. Le couple de démarrage relatif (en P.u.) d'un moteur à haute vitesse est toujours plus fort que celui d'un moteur à basse vitesse de même catégorie.

II.7. Bilan de puissance d'une machine asynchrone :

Pour certain application donnée et avant d'utilise quelque machine électrique il faut connaitre les caractéristique (courant et tension) et les paramètres intérieure (résistance, inductance des bobines ...etc) de la machine pour adapter l'alimentation de réseau, la protection, et le meilleur rendement c'est pour ça en va voir le bilan de puissance et les calculs des grandeurs de moteur asynchrone.

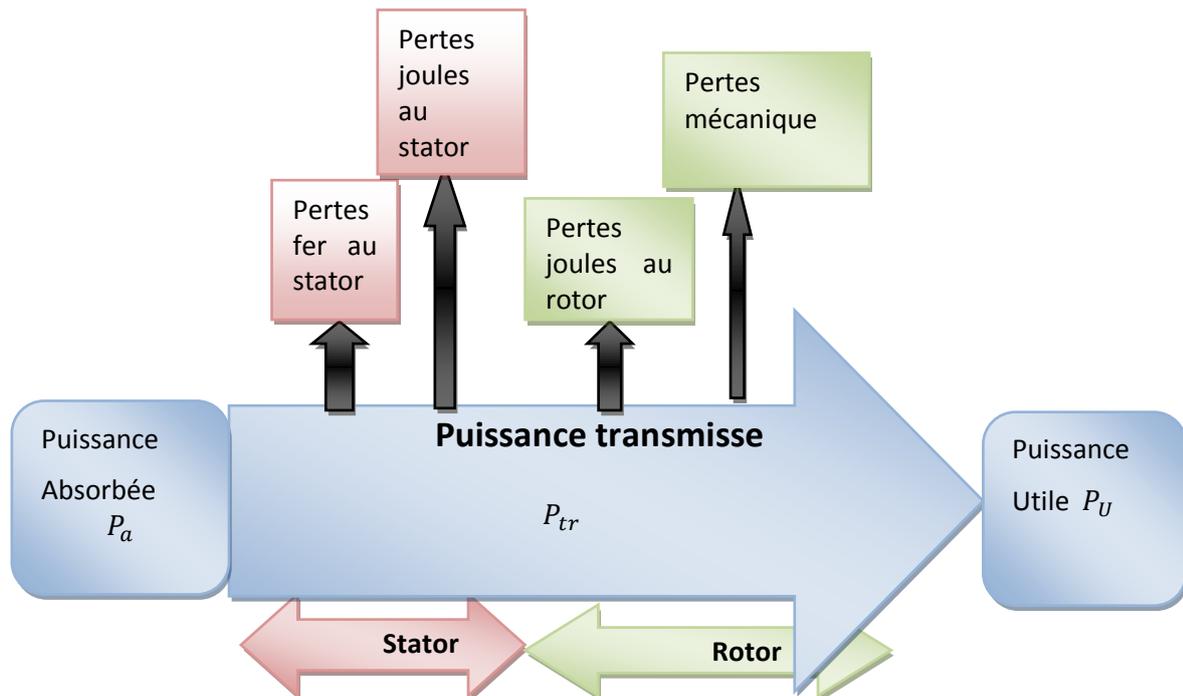


Figure. II-4 : Bilan de puissance.

II.8. Calcul des grandeurs électrique de la machines :

$$P_a = UI \cos \varphi$$

P_a : Puissance fournie par le réseau

U : Tension de réseau

I : Courant de réseau

φ : le déphasage entre la tension et le courant de réseau

$$P_{tr} = C_m \omega_s = P_a - \text{pertes statorique} = C_m W_s$$

P_{tr} : Puissance transmise de du stator au rotor

C_m : Couple électromagnétique

W_s : Vitesse synchrone de champ magnétique en radian par second

$$P_u = C_u W = C_u 2\pi n$$

P_u : Puissance mécanique en sortie en watt

C_u : Couple utile moteur en mètre newtons

n : Vitesse de rotor en tour/min

W : Vitesse de rotor en radian par second

$$P_{Jr} = P_{tr} - C_m W = C_m (W_s - W) = g W_s C_m = g P_{tr}$$

P_{Jr} : Pertes joule au rotor

Remarque :

Les pertes fer sont essentiellement localisées au stator ; elles sont négligeables dans le rotor.

$$P_u = C_u W = P_a - \text{pertes}$$

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_a - \text{pertes}}{P_a} = \frac{C_u W}{C_u W + \text{pertes}} = \frac{C_u W}{P_a}$$

η : le rendement de la machine

Pertes = P fer stator + PJ stator + P mécaniques.

II.9.Conclusion :

La majorité des systèmes de pompage sont utilisables dans les zones industrielles c'est pour ça on utilise un moteur électrique pour un meilleur rendement est pour la protection de l'environnement contre la pollution.

Les variateurs de vitesse

III.1.Introduction :

L'utilisation des convertisseurs de fréquence pour des différentes applications devient de plus en plus importante. Dans ce chapitre, nous allons présenter les différents hacheurs qui sont utilisés dans les processus de variation de vitesse du moteur.

Ensuite, nous donnerons une description détaillée de la stratégie d'obtention d'une commande MLI utilisée pour la variation de vitesse.

III.2.Définition :

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné. Suivant le type de machine à commander et suivant la nature de la source de puissance (monophasée ou triphasée), on distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques [5].

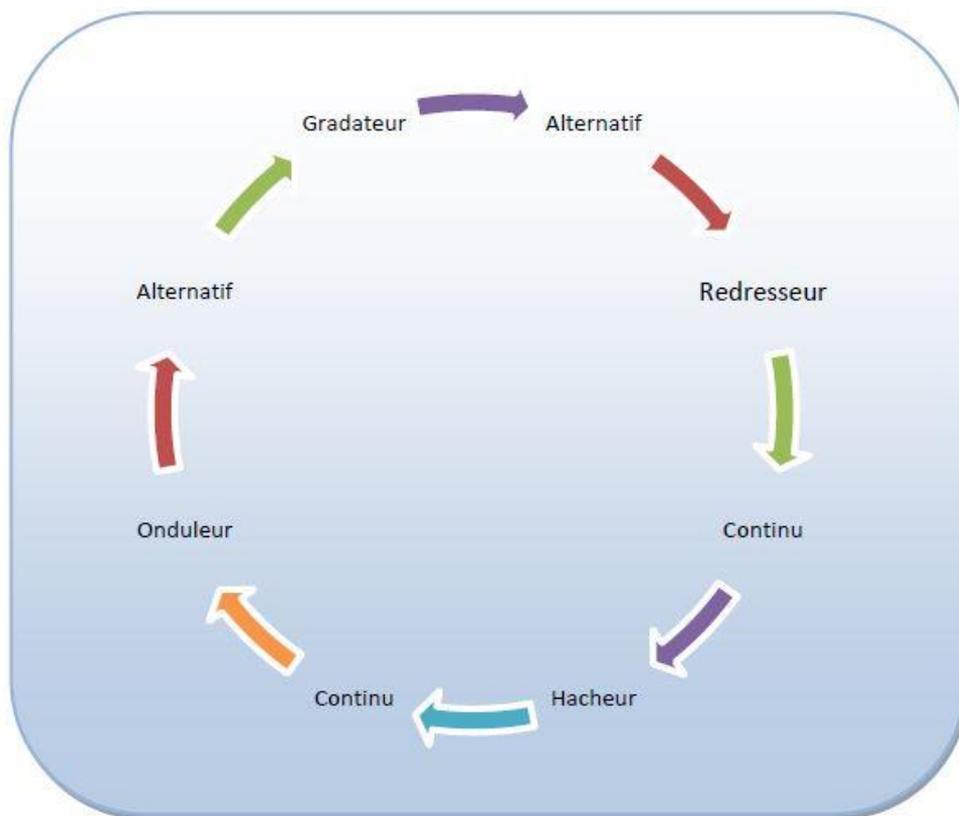


Figure. III-1 : Diagramme des divers types de convertisseurs statiques en électronique de puissance

III.3. Les redresseurs :

Ce sont des convertisseurs alternatif-continu qui permettent de convertir une tension alternative en une tension continue unidirectionnelle, si ils sont commandés la valeur moyenne de la tension obtenue est alors réglable [6].

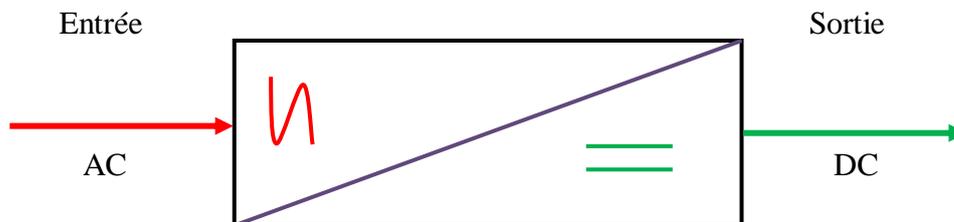


Figure. III-2 : Convertisseurs alternatif-continu.

Dans ce type de convertisseur, on peut les classer en deux classes : les redresseurs non contrôlés et les redresseurs contrôlés.

❖ Le redresseur commande :

Dans les redresseurs commandés, les diodes sont remplacées par des thyristors pour commander la puissance voulue aux bornes du récepteur.

➤ Principe de fonctionnement :

Comme pour le hacheur, le redresseur permet de faire varier la tension moyenne du moteur. On fait varier la tension de moteur en agissant sur l'angle d'amorçage des thyristors. L'avantage du redresseur est qu'il transforme directement la tension alternative en tension continue variable ce qui représente un coût moins important par rapport au hacheur.

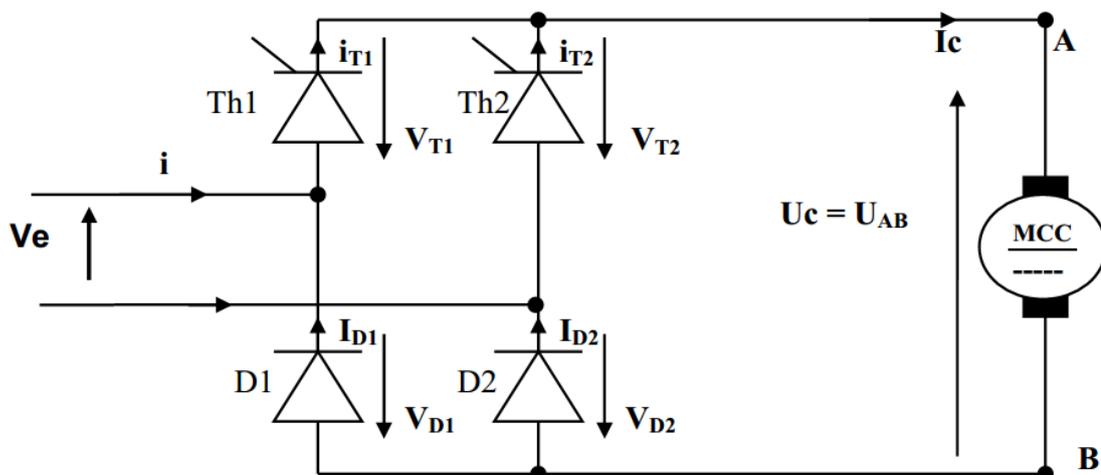


Figure. III-3 : Redresseur commandé pont mixte symétrique.

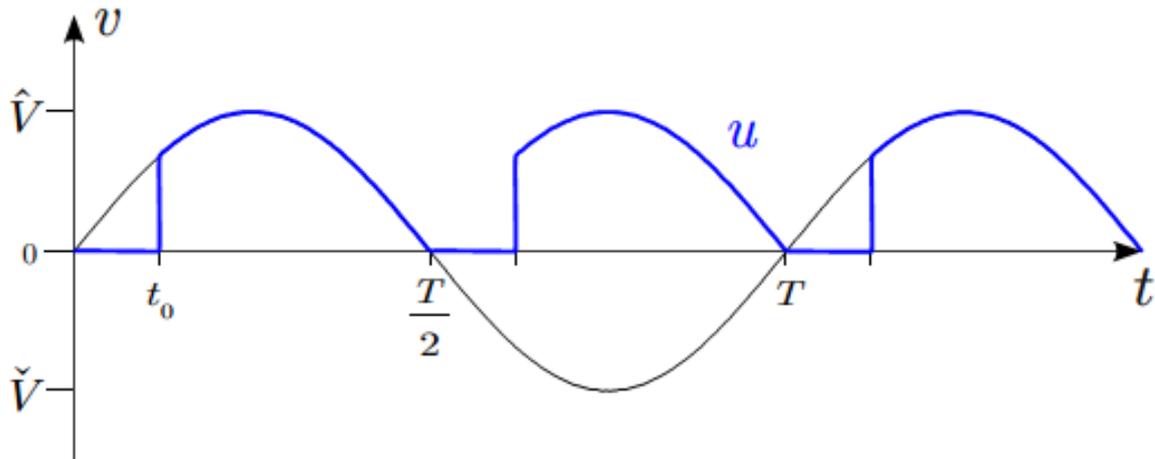


Figure. III-4 : La tension aux bornes de la charge avec un redresseur commande.

➤ **Valeur moyenne de la tension redressée :**

$$U_{Cmoy} = \frac{1}{T} \int_0^T U_c(t) dt = \frac{1}{\pi} \int_{\delta}^{\pi} U \sin \theta d\theta = \frac{U}{\pi} [-\cos \theta \cos \delta]_{\delta}^{\pi}$$

$$U_{Cmoy} = \frac{U}{\pi} (1 + \cos \delta)$$

δ : L'angle d'amorçage.

Réglage de la vitesse de rotation d'un moteur à courant continu. Le pont mixte alimente un moteur à courant continu à excitation indépendante et constante, sa fém s'exprime en fonction de la vitesse de rotation par la relation :

$$E = K \cdot n$$

n : vitesse de rotation (en tr/s).

La tension U_c s'exprime en fonction des éléments de la charge par la relation :

$$E = U_c - Ri - L \frac{di}{dt}$$

En valeur moyenne :

$$E = \langle U_c \rangle - R \cdot \langle i \rangle = K \cdot n$$

La vitesse de rotation du moteur s'exprime en fonction de l'angle δ :

$$n = \frac{1}{K} \left[\frac{U}{\pi} (1 + \cos \delta) - R \cdot \langle i \rangle \right]$$

III.4. Les onduleurs :

Les onduleurs sont les convertisseurs statiques continu-alternatif permettant de fabriquer une source de tension alternative à partir d'une source de tension continue.

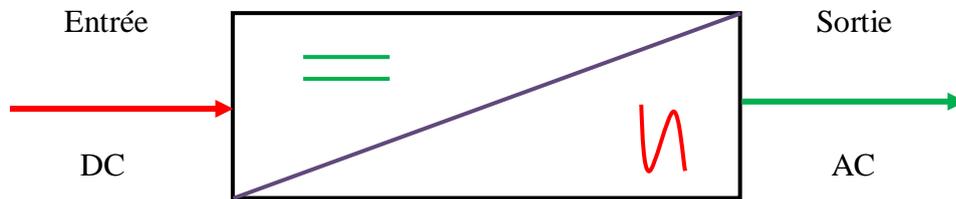


Figure. III-5 : convertisseurs statiques continu-alternatif.

On distingue les onduleurs de tension et les onduleurs de courant, en fonction de la source d'entrée continue : source de tension ou source de courant. La technologie des onduleurs de tension est la plus maîtrisée et est présente dans la plupart des systèmes industriels, dans toutes les gammes de puissance (quelques Watts à plusieurs MW) [5].

III.5. Les gradateurs :

Le gradateur est un appareil qui permet de convertir une tension alternative sinusoïdale à fréquence fixe et de valeur efficace constante en une tension alternative de valeur efficace réglable.

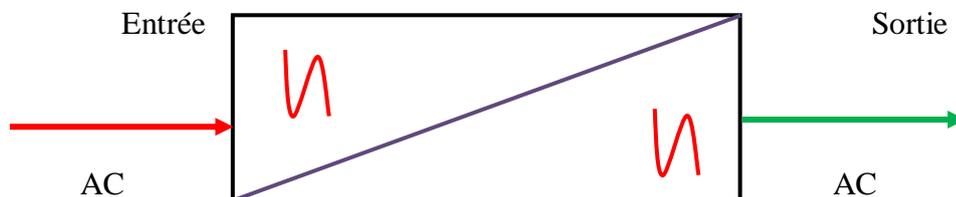


Figure. III-6 : Gradateur.

Dans ce type de convertisseur on distingue deux types de commande :

- Gradateur à angle de phase ;
- Gradateur à train d'onde.

III.6. Les hacheurs :

Le hacheur est un dispositif permettant d'obtenir une tension continue de valeur moyenne réglable à partir d'une source de tension continue fixe (batterie d'accumulateurs ou bien pont redresseur - alimenté par le réseau de distribution).

Un hacheur peut être réalisé à l'aide des interrupteurs électroniques commandables à la fermeture et à l'ouverture telle que les transistors bipolaires ou IGBT ou les thyristors GTO.

III.6.1.Principe de fonctionnement :

Le principe du hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source- charge à l'aide d'un interrupteur électronique [7].

III.6.2.Le rapport cyclique α :

Le rapport cyclique est défini comme le temps (t_F) pendant lequel l'interrupteur est fermé divisé par la période de fonctionnement du montage (T).

$$\alpha = \frac{t_F}{T}$$

La valeur de rapport cyclique : $0 \leq \alpha \leq 1$

III.7.Différents types d'hacheurs :

Selon la position du commutateur et du hacheur, différents types de convertisseurs de tension peuvent être réalisés :

- Abaisseur de tension «Buck »
- Élévateur de tension « Boost »

III.7.1.Convertisseur Buck :

Hacheur abaisseur, hacheur dévolteur, hacheur série, hacheur de type Buck.

Le hacheur série est un convertisseur direct DC–DC. La source d'entrée est de type tension continue et la charge de sortie continue de type source de courant. L'interrupteur peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage).

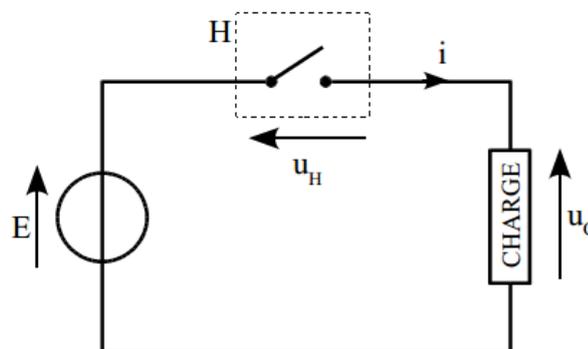


Figure. III-7 : Le fonctionnement d'un hacheur BUCK.

❖ Principe de Fonctionnement :

Le cycle de fonctionnement, de période de hachage ($T = \frac{1}{f}$), comporte deux Etapes. Lors de la première étape, on rend le transistor passant et la diode, polarisée en inverse, est bloquée. Cette phase dure de ($0 \leq t \leq \alpha T$). Lors de la seconde étape on bloque le transistor, la diode devient passante, cette phase dure de $\alpha T \leq t \leq T$.

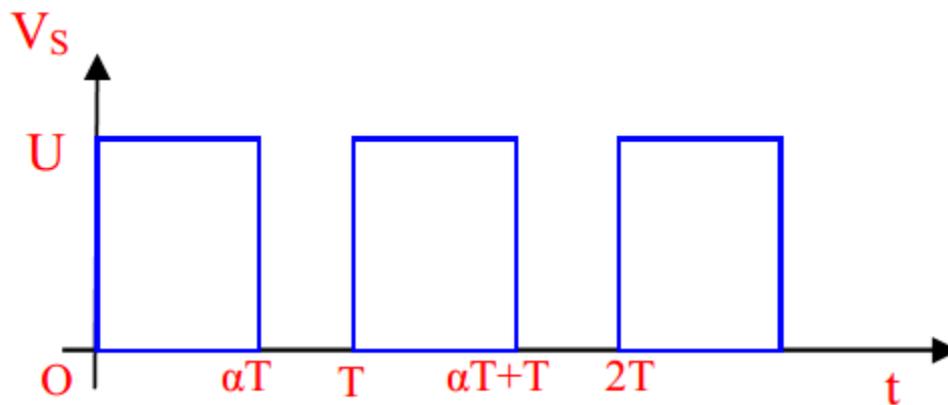


Figure. III-8 : la tension aux bornes de la charge avec un hacheur série.

❖ Valeur moyenne de la tension :

$$V_{\text{Smoy}} = \frac{1}{T} \int_0^T V_s(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T 0 dt$$

$$V_{\text{Smoy}} = \frac{U}{T} (\alpha T - 0) = \alpha U$$

La valeur moyenne de la tension V_{Smoy} peut être ajustée en jouant sur la valeur du rapport cyclique α . Quand on fait varier α de 0 à 1, V_{Smoy} varie linéairement de 0 à U.

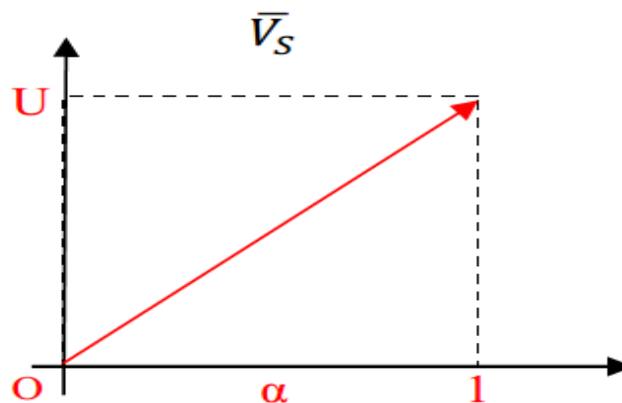


Figure. III-9 : La valeur moyenne en fonction de rapport cyclique (α)

❖ Intérêt d'utiliser un hacheur série :

Le hacheur série permet de faire varier la vitesse de rotation des moteurs à courant continu. On rappelle que la vitesse d'un tel moteur est proportionnelle à la tension d'alimentation.

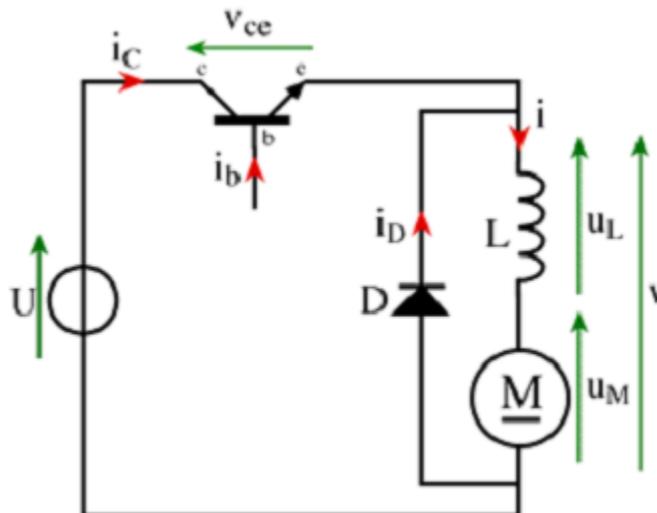


Figure. III-10 : Hacheur série commande un moteur à courant continu.

Pour un bon fonctionnement du moteur, il est préférable que le courant soit le plus régulier possible, d'où la présence d'une bobine de lissage. Si son inductance est suffisamment grande, on pourra considérer le courant comme constant ($\Delta i \approx 0$) [7].

Loi des mailles :

$$V_S = U_M + U_L$$

On passe aux valeurs moyennes :

$$\langle V_S \rangle = \langle U_M \rangle + \langle U_L \rangle$$

Et comme pour un signal périodique :

$$\langle U_L \rangle = 0$$

Nous obtenons pour le moteur :

$$\langle V_S \rangle = \langle U_M \rangle = E$$

$$\langle V_S \rangle = E = \alpha U$$

$$E = K \cdot \Phi \cdot \Omega = \alpha U$$

Ω : La vitesse de rotation du moteur.

Φ : Le flux d'inducteur (égale à constant pour le moteur à excitation séparé). Finalement la f.é.m. du moteur peuvent être régler grâce au rapport cyclique par la relation :

$$E = K' \cdot \Omega = \alpha U \quad \Omega = K'' \cdot \alpha$$

Avec :

$$K'' = \frac{U}{K'}$$

On voit ici que la vitesse varie linéairement avec le rapport cyclique α , lequel est proportionnel à la tension de commande.

III.7.2. Convertisseur Boost :

Hacheur élévateur, hacheur survolteur, hacheur parallèle, hacheur de type Boost.

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu et la charge de sortie est de type tension continue l'interrupteur peut être remplacé par un transistor puisque le courant est toujours positif et que les commutations doivent être commandées (au blocage et à l'amorçage) [5].

III.8. Hacheur à quatre quadrants :

Pour obtenir une réversibilité quatre quadrants, il suffit d'associer tête bêche deux hacheurs réversibles deux quadrants (K1, K2, D1, D2) et (K3, K4, D3, D4). La tension peut être négative ou positive, le courant aussi.

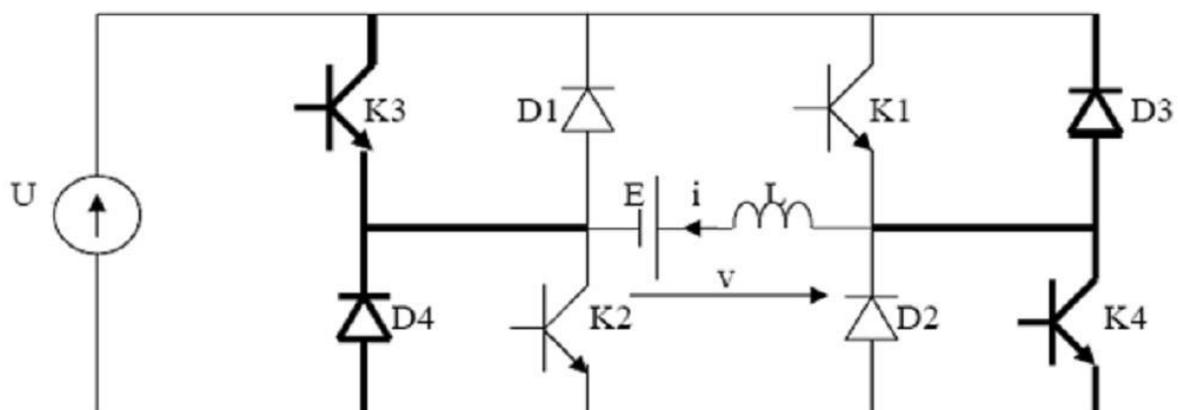


Figure. III-11 : Hacheur à quatre quadrants.

On procède ainsi : A chaque période T : On commande la fermeture de $K1$ et $K2$ pendant $(0 \leq t \leq \alpha T)$. On commande la fermeture de $K3$ et $K4$ pendant $(\alpha T \leq t \leq T)$.

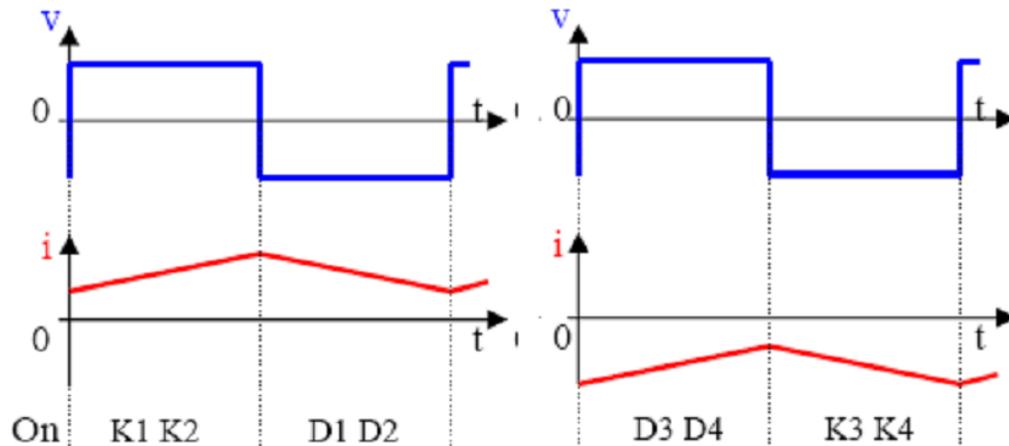


Figure. III-12 : la tension aux bornes de la charge avec un hacheur quatre quadrants.

- **Valeur moyenne de la tension aux bornes de la charge :**

$$V_{Smoy} = \frac{1}{T} \int_0^T V_S(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{\alpha T} U dt + \frac{1}{T} \int_{\alpha T}^T -U dt$$

$$V_{Smoy} = U(2\alpha - 1)$$

Maintenant on peut avoir ($V_{Smoy} < 0$) (formule), le courant pouvant également être négatif donc on peut avoir un sens de rotation négatif. Quand (α) varie de (0 à 1), la tension moyenne varie de ($-U$ à $+U$). On dispose de 4 quadrants modes de fonctionnement : $V > 0$ et $I > 0$ Rotation dans le premier sens. $V < 0$ et $I > 0$, Phase de freinage (récupération de l'énergie).

$V < 0$ et $I < 0$, Rotation dans le deuxième sens. $V > 0$ et $I < 0$, Phase de freinage (récupération de l'énergie).

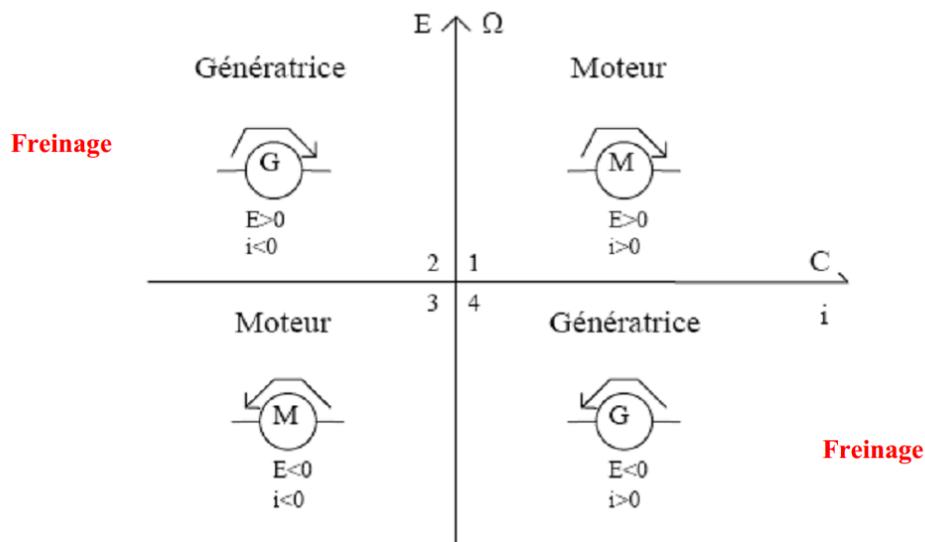


Figure. III-13 : Principe du fonctionnement d'un Hacheur quatre quadrants.

III.9. Technique de commande MLI :

La qualité de la tension de sortie d'un hacheur dépend largement de la technique de commande utilisée pour commander les interrupteurs de ce hacheur. Il existe plusieurs techniques de commande et le choix d'une technique parmi toutes les possibilités dépend essentiellement du type d'application auquel l'appareil est désigné. La technique la plus utilisée dans les variateurs de vitesse est la commande par modulation de la largeur d'impulsion MLI. Les techniques de modulation de largeur d'impulsions sont multiples. Cependant, 04 catégories de MLI ont été développées :

- Les modulations sinus-triangle effectuant la comparaison d'un signal de référence à une porteuse, en général, triangulaire.
- Les modulations pré-calculées pour lesquelles les angles de commutation sont calculés hors ligne pour annuler certaines composantes du spectre.
- Les modulations post-calculées encore appelées MLI régulières symétriques ou MLI vectorielles dans lesquelles les angles de commutation sont calculés en ligne.
- Les modulations stochastiques pour lesquelles l'objectif fixé est le blanchiment du spectre (bruit constant et minimal sur l'ensemble du spectre). Les largeurs des impulsions sont réparties suivant une densité de probabilité représentant la loi de commande.

Le développement considérable de la technique de modulation en largeur d'impulsion ouvre une large étendue d'application dans les systèmes de commande et beaucoup d'autres

fonctions. Elle permet une réalisation souple et rentable des circuits de commande des hacheurs. [14]

❖ Principe de la commande MLI :

Le Principe de base de la Modulation de la Largeur d'impulsion MLI est fondé sur le découpage d'une pleine onde rectangulaire. Ainsi, la tension de sortie est formée par une succession de créneau d'amplitude égale à la tension continue d'alimentation et de largeur variable. La technique la plus répandue pour la production d'un signal MLI est de comparer entre deux signaux.

- Le premier, appelé signal de référence, est un signal continue qui varie entre deux seuils définis en fonction de notre application.
- Le second, appelé signal de la porteuse, définit la cadence de la commutation des interrupteurs statiques du convertisseur. C'est un signal de haute fréquence par rapport au signal de référence.
- L'intersection de ces signaux donne les instants de commutation des interrupteurs.

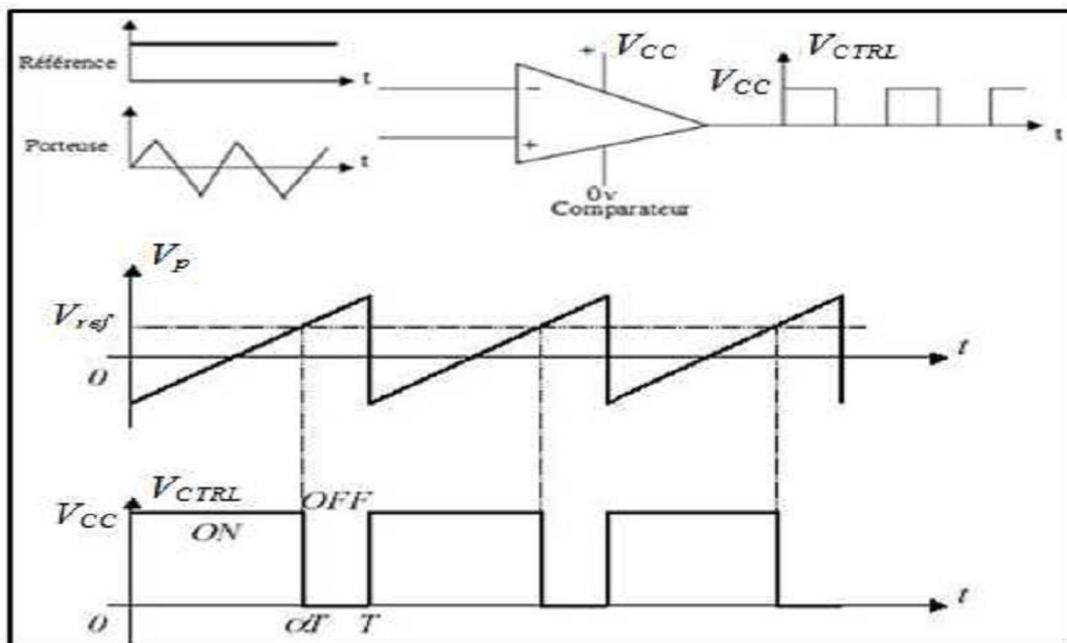


Figure. III-14 : Réalisation du signal MLI.

III.10. Variateur de vitesse :

Le variateur de vitesse est composé essentiellement :

- Redresseur qui, connecté à une alimentation triphasée (le réseau), génère une tension continue à ondulation résiduelle (le signal n'est pas parfaitement continu). Le redresseur peut être de type commandé ou pas ;
- Circuit intermédiaire agissant principalement sur le "lissage" de la tension de sortie du redresseur (améliore la composante continue). Le circuit intermédiaire peut aussi servir de dissipateur d'énergie lorsque le moteur devient générateur ;
- Onduleur qui engendre le signal de puissance à tension et/ou fréquence variables ;
- Electronique de commande pilotant (transmission et réception des signaux) le redresseur, le circuit intermédiaire et l'onduleur.

Le variateur de vitesse est principalement caractérisé selon la séquence de commutation qui commande la tension d'alimentation du moteur. On a :

- Les variateurs à source de courant (CSI),
- Les variateurs à modulation d'impulsions en amplitude (PAM),
- Les variateurs à modulation de largeur d'impulsion (PWM/VVC).

III.11. Principes de base des variateurs de vitesse :

Comme dans le cas de la machine synchrone, l'alimentation à fréquence variable des machines asynchrones se fait à l'aide d'un convertisseur statique généralement continu-alternatif.

La source d'entrée peut être du type source de courant ou du type source de tension. En sortie du convertisseur, on contrôle l'amplitude des tensions ou des courants statoriques ainsi que leur fréquence f_s . [14]

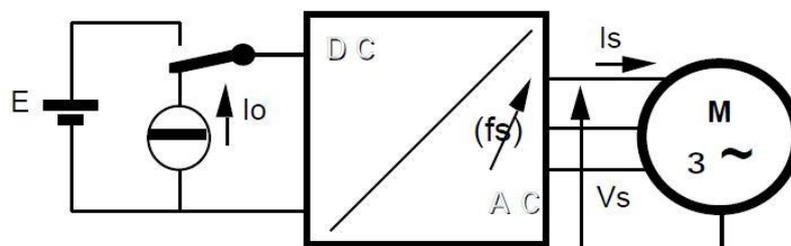


Figure. III-15 : Convertisseur statique généralement continu-alternatif.

III.12. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a vu la stratégie des variateurs de vitesse utilisant les convertisseurs de fréquence MLI.

Les différentes méthodes utilisées pour commander la vitesse de la machine asynchrone ont été développés. Parmi les méthodes, nous avons choisi le réglage par fréquence pour changer le débit à partir de la vitesse de rotation d'arbre de notre pompe centrifuge.

Calcul
&
Simulation

IV.1. Partie Calcul :

IV.1.1.Introduction :

Le maintien d'un débit à un point de fonctionnement rationnel de la pompe est plus que nécessaire, car toute déviation majeure par rapport à ce point représente un risque de destruction de la pompe. Ainsi notre objectif est de maintenir un fonctionnement optimal de la pompe, ce point de fonctionnement ne peut être maintenu que par un contrôle fiable du débit de refoulement de la pompe. Une pompe centrifuge doit être choisie selon les caractéristiques réelles de l'installation dans laquelle on doit l'installer.

La pompe CPKN-S1 fabriquée par le constructeur KSB, elle est conçue pour la circulation d'eau dans un réseau anti-incendie, cette pompe est une machine de grande qualité, assemblée et testée en usine avec le plus grand soin, accouplée à un moteur électrique. On a proposé d'équiper la pompe d'un dispositif de variation continue de vitesse qui est la méthode idéale pour modifier les caractéristiques $H=f(Q)$ tout en conservant un bon rendement dans une large plage de fonctionnement.

IV.1.2.Choix de la pompe centrifuge :

Les données de la pompe sont comme suit :

- Q (débit) = 345,6 m³/h
- H_{ga} (hauteur géométrique à l'aspiration) = 3 m.
- H_{gp} (hauteur géométrique au refoulement) = 23 m.
- ΔP_C = 17,9 m.

IV.1.2.1.Calcul de la hauteur manométrique :

$$H_{mt} = H_{gt} + \Delta P_C \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$H_{gt} = H_{gp} - H_{ga} \quad \dots\dots\dots (2)$$

La hauteur manométrique totale que la pompe doit atteindre est donc :

$$H_{mt} = H_{gt} + \Delta P_C = H_{gp} - H_{ga} + \Delta P_C = 23 - 3 + 17,9 = 37,9 \approx 38\text{m} \quad \dots\dots\dots (3)$$

Donc pour un débit de 345,6 m³/h la hauteur manométrique égale 37.9 m.

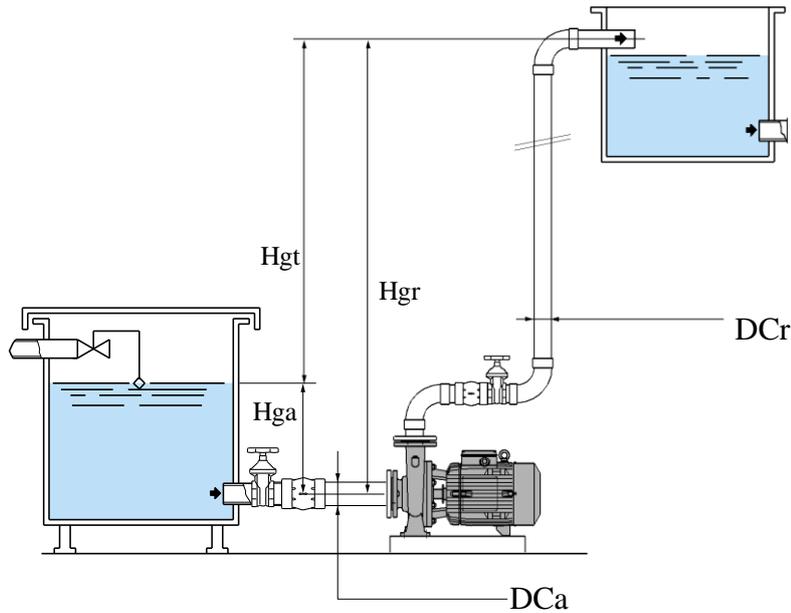


Figure.IV-1 : Fonctionnement en charge de la pompe proposé. [15]

- **Caractéristique de la pompe :**

N° Etage = 1

- $N = 1480$ tr/min.
- $\eta = 80,9\%$.
- $\zeta = 0.814$ Kg/cm³.
- $NPSH_{requis} = 2,4$ m.
- $NPSH_{requis} = 3$ m.
- $P_{asp} = 35,92$ kw.

Q_0	0	67,5	174,3	279,1	345,6	424,7
H_0	50,8	48,9	45,92	41,54	37,96	32,4

Tableau. IV-1 : $Q_0 = f(H_0)$

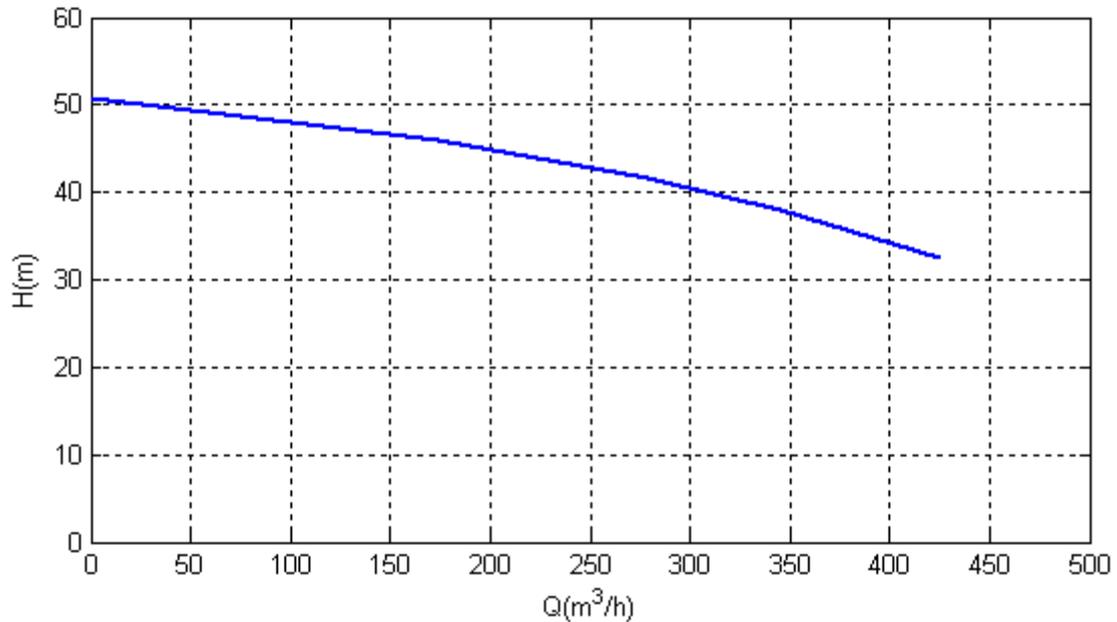


Figure. IV-2 : courbe caractéristique de la pompe.

IV.1.2.2. Courbe caractéristique de la conduite :

$$\Delta P_c = KQ^2$$

En remplaçant l'équation (3) dans l'équation (1), on trouve :

$$H_{mt} = H_{gt} + KQ^2$$

La grandeur K pour la conduite donnée est une valeur constante et peut être calculée selon les dimensions géométriques des conduites et le régime d'écoulement du liquide. L'unité de mesure pour K (s^2/m^5). [15]

$$H_{mt} = 37,9 \text{ m.}$$

$$H_{gt} = 20 \text{ m.}$$

$$Q = 345,6 \text{ m}^3/\text{h} = 5,76 \text{ m}^3/\text{min} = 0,09 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\implies 37,9 = 20 + K (345,6)^2 \implies K = \frac{37,9 - 20}{33} = 0,54 \text{ (s}^2/\text{m}^3\text{)}.$$

Q (m³/s)	Q² (m³/s)²	KQ²(m)	Hmt(m)
0	0	0	20
1,12	1,25	0,67	20,67
2,9	8,41	4,54	24,54
4,65	21,62	11,67	31,67
5,76	33,17	17,91	37,91
7	49	26,46	46,46

Tableau. IV-2 : $Q_1 = f(H_1)$

Le point de fonctionnement de la pompe et le point d'intersection de la courbe caractéristique de la pompe et de l'installation. $Q = 345,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $H = 37,9 \text{ m}$.

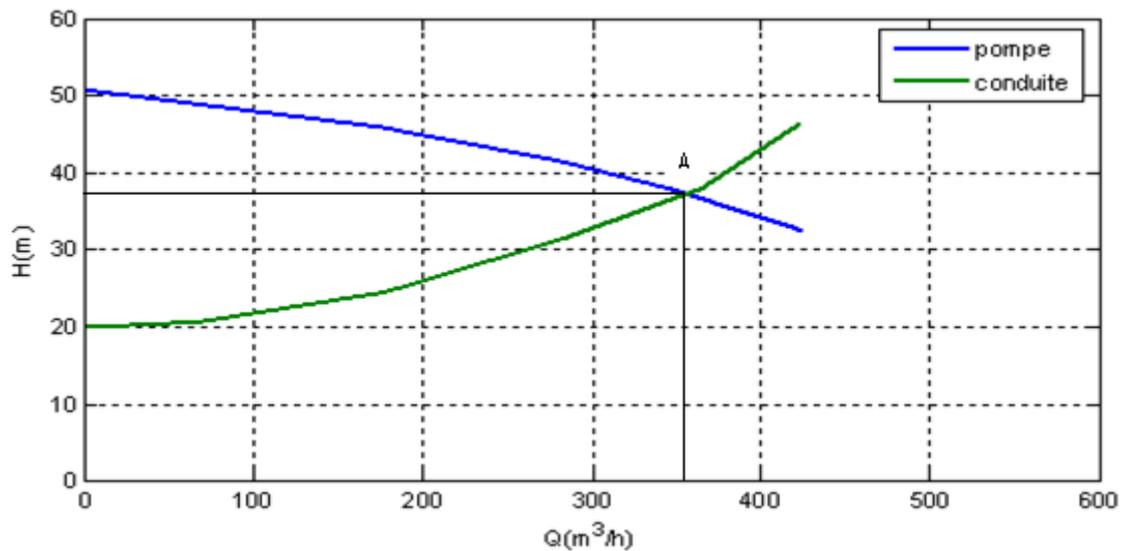


Figure. IV-3 : courbe caractéristique de la conduite.

IV.1.3.Choix du moteur :

Avant de procéder au dimensionnement du variateur, il est nécessaire de faire un choix convenable du moteur qui dépend essentiellement de la puissance de la pompe à entraîner.

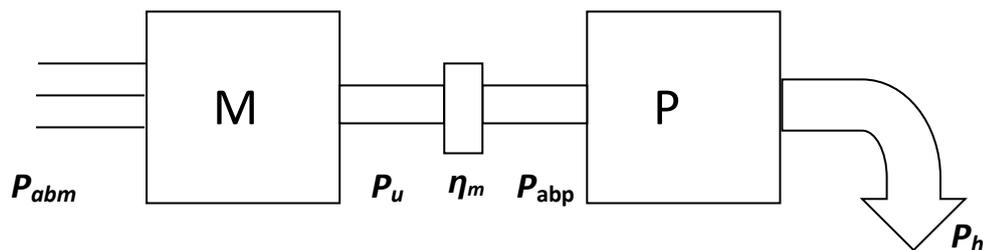


Figure. IV-4 : les puissances de système.

$$P_h = \frac{\rho \cdot g \cdot H \cdot Q}{3600} = \frac{0,814 \cdot 9,81 \cdot 345,6 \cdot 37,9}{3600} = 29 \text{ kw.}$$

$$\implies P_h = 29 \text{ kw.}$$

Les pompes centrifuges sont souvent accouplées directement à l'arbre d'un moteur électrique

$$\eta_m = 0,9 \div 0,98 \text{ (accouplement)} \implies \eta_m = 0,98.$$

$$P_{abp} = 35,92 \text{ kw} \implies P_u = \frac{P_{abp}}{\eta_m} = \frac{35,92}{0,98} = 36,65 \text{ kw.}$$

A partir de ces paramètres, on choisit le moteur selon les puissances normalisées qui sont données par le constructeur.

- On choisit un moteur de puissance $P_{abp} > 35,92$ kw.
- Le moteur normaliser choisi et de type PE 250 M/A.

- **Caractéristique du moteur :**

- $P_{abp} = 47,5$ kw.
- $N = 1480$ tr/min.
- $\eta_m = 92,5$ %
- $\cos \alpha = 0,86$.
- $R_s = 1.2$.
- $R_r = 1.8$.
- $L_s = 0.1554$.
- $L_r = 0.15684$.
- $M = 0.15$.
- $j = 0.071$.
- $f = 0.0001$.
- $p = 2$

- **Bilan des puissances :**

On néglige les pertes fer et les pertes mécaniques.

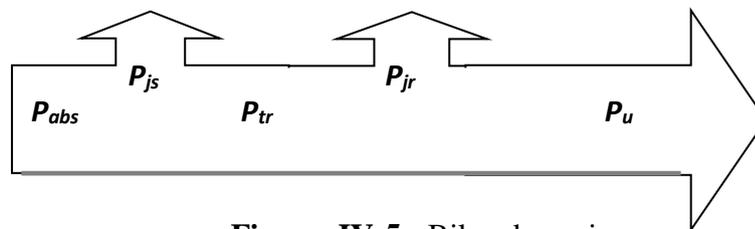


Figure. IV-5 : Bilan des puissances.

- **Calcul des pertes du moteur :**

- **Vitesse de synchronisme :**

La vitesse de synchronisme des moteurs asynchrones triphasés est proportionnelle à la fréquence du courant d'alimentation et inversement proportionnelle au nombre de paires de pôles constituant le stator.

$$N_s = \frac{60.f}{p} = \frac{60.50}{2} = 1500 \text{ tr/min.}$$

- **Glissement :**

C'est la différence entre la vitesse synchrone N_s et la vitesse N de fonctionnement

nominal qui est normalement exprimée en pourcentage. Selon les moteurs. Le glissement est l'une des caractéristiques les plus importantes d'un moteur à induction.

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{1500 - 1480}{1500} = 0,01 = 1\%$$

➤ **Pulsation de synchronisme :**

$$\Omega_s = \frac{2\pi \cdot N_s}{60} = \frac{2,3,14 \cdot 1500}{60} = 157 \text{ rad/s.}$$

➤ **Pulsation du rotor :**

$$\Omega = \frac{2\pi \cdot N}{60} = \frac{2,3,14 \cdot 1480}{60} = 154,9 \text{ rad/s.}$$

➤ **Puissance utile :**

$$P_{abs} = \frac{P_u}{\eta_m} \implies P_u = P_{abs} \cdot \eta_m = 47,5 \cdot 0,92 = 43,7 \text{ kw.}$$

➤ **Puissance transmise au rotor :**

$$P_{tr} = C_{em} \cdot \Omega_s$$

$$P_u = P_{tr} - P_j = P_{tr} [1-g] = C_{em} \cdot \Omega_s \cdot [1-g].$$

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s} \implies \Omega = \Omega_s \cdot [1-g] \implies P_u = C_{em} \cdot \Omega = C_u \cdot \Omega$$

$$P_{tr} = C_u \cdot \Omega_s$$

$$C_u = \frac{P_u}{\Omega} = \frac{43,7 \cdot 10^3}{154,9} = 282,1 \text{ Nm}$$

$$P_{tr} = 282,1 \cdot 157 = 44289,7 \text{ w} = 44,28 \text{ kw.}$$

➤ **Perte joule statorique :**

$$P_{js} = P_{abc} - P_{tr} = 47,5 - 44,28 = 3,22 \text{ kw.}$$

➤ **Perte joule rotor :**

$$P_{jr} = P_{tr} \cdot g = 44,28 \cdot 0,01 = 0,44 \text{ kw.}$$

IV.1.4. Réglage de débit :

Dans toutes les branches de l'industrie pétrolière, existe d'une nombreuse installation sur les quelles, les pompes ne fonctionnent pas avec un débit constant.

La méthode classique la plus largement utilisée pour le réglage de débit des pompes est celle avec vanne de réglage située sur la canalisation de refoulement (en Aval) de la pompe pour éviter le risque de cavitation.

- **Cas du vannage avec une pompe à vitesse fixe :**

Sur une installation donnée (pompe et réseau), il est possible de faire varier le débit tout en conservant une vitesse de rotation fixe. il suffit pour cela de fermer une vanne au refoulement de la pompe. Les pertes de charge (donc de pression) augmentent et le débit diminue. Le point de fonctionnement remonte, le rendement diminue et la consommation augmente.

Q (m ³ /h)	H _{mt} (m)	N (tr/mn)	F(Hz)	η (%)	P (kw)	C (w/m ³)
174,3	45,92	1480	50	63,14	28,11	161,2
279,1	41,54	1480	50	78,5	32,75	117,3
345,6	37,9	1480	50	80,98	35,92	103,9
424,7	32,4	1480	50	76,11	40,09	94,39

Tableau. IV-3 : Les données obtenues par le test de la pompe

- **Courbe caractéristique de la conduite pour Q=279,1m³/h, H=41,54m.**

$$H_{mt} = H_g + \Delta P_c = H_g + KQ^2$$

$$\Rightarrow K = \frac{H_{mt} - H_g}{Q^2} = \frac{41,54 - 20}{21,62} = 0,99 \text{ (s}^2/\text{m}^5\text{)}$$

Q (m ³ /s)	Q ² (m ³ /s) ²	KQ ² (m)	H _{mt} (m)
0	0	0	20
1,12	1,25	1,23	21,23
2,9	8,41	8,32	28,32
4,65	21,62	21,4	41,4
5,76	33,17	32,83	52,83
7	49	48,51	68,51

Tableau. IV-4 : Q₁ = f(H₁)

- **Courbe caractéristique de la conduite pour $Q=174,3\text{m}^3/\text{h}$, $H=45,92\text{m}$.**

$$K = \frac{45,92 - 20}{8,43} = 3 \text{ (m}^3/\text{h)}.$$

Q (m ³ /s)	Q ² (m ³ /s) ²	KQ ² (m)	Hmt(m)
0	0	0	20
1,12	1,25	3,75	23,75
2,9	8,41	25,23	45,23
4,65	21,62	64,86	84,86
5,76	33,17	99,51	119,51
7	49	147	167

Tableau. IV-5 : $Q_2 = f(H_2)$

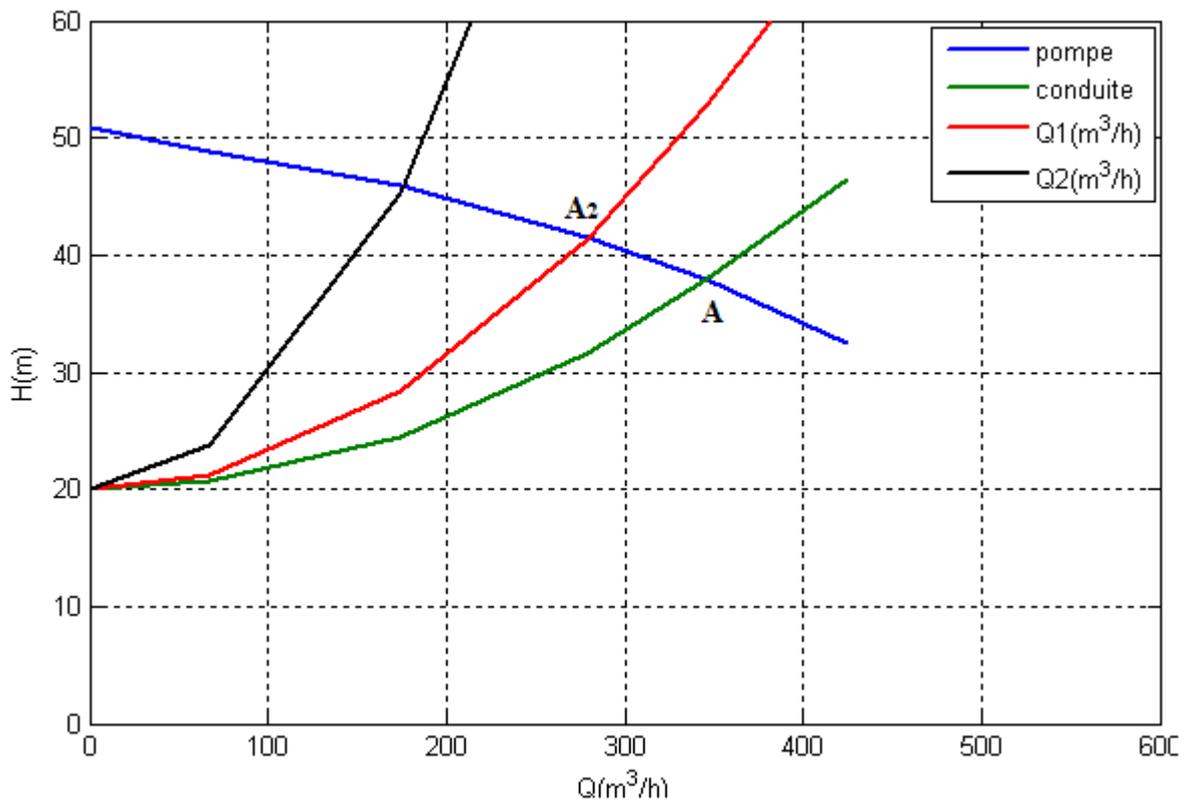


Figure. IV-6 : courbes caractéristiques de la conduite (vanne de réglage).

- **Application de l'entraînement à vitesse variable :**

En modifiant la vitesse de rotation d'une pompe centrifuge, on va changer ces caractéristiques. La pompe fournira plus de pression et plus de débit si sa vitesse augmente et inversement.

La courbe caractéristique se trouve alors modifiée. On peut cependant reconstruire la nouvelle courbe par le calcul à l'aide de formule appelée **lois de similitude** qui à partir d'une courbe caractéristique établie pour une vitesse de rotation N quelconque.

Si on connaît pour une vitesse N , le débit (Q_n), la hauteur manométrique totale Hmt , les lois de similitudes permettent de déterminer (Qn' , Hmt') pour une vitesse N' quelconque.

IV.1.5.Choix du variateur :

A partir de la puissance du moteur on choisit le variateur qui convient :

- $P = 47,5\text{kw}$.

On choisira un variateur de fréquence type MLI. Contrôle des tensions statoriques ACS 601- 0070– 5. [16]

- **Caractéristique du variateur**

- Ponte d'entrée : redresseur 6 diodes
- Courant d'entrée : 92A
- Courant de sortie continu : 84A
- Degré de protection : IP 21

- **Débit varie entre 424,7 et 174,3 (m³/h)**

A flux statorique et à couple constante, la pulsation du courant rotorique W_r et l'écart

$$\Omega_s - \Omega = \frac{W_r}{P}$$

- **Calcul de la vitesse de rotation du moteur d'entraînement**

- Pour $f_1 = 55$ (Hz).

$$N_s = \frac{60.f}{p} = 1650 \text{ tr/min.}$$

$$W_s = 2. \Pi. f = 2.3, 14.55 = 345, 4 \text{ rd/s}$$

$$\Omega_s = \frac{W_s}{P} = 172,7 \text{ rd/s.}$$

$$g = \frac{W_r}{W_s} = \frac{6,28}{345,4} = 0,018.$$

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \implies N = N_s (1-g) = 1650(1-0,018) = 1620 \text{ tr/min}$$

- Pour $f_n = 50 \text{ (Hz)}$ $Q_n = 345,5 \text{ (m}^3\text{/h)}$ $N_n = 1480 \text{ tr/mn}$

$$P_{jr} = 0, 44 \text{ kw.}$$

$$P_{js} = 3, 22 \text{ kw.}$$

$$W_s = 2. \Pi. f = 2.3, 14.50 = 314 \text{ rd/s.}$$

$$g = \frac{W_r}{W_s} = 0, 01 \implies W_r = g.W_s = 0,01.314 = 3,14 \text{ rd/s.}$$

- Pour $f_2 = 47,2 \text{ (Hz)}$.

$$N_s = \frac{60.f}{p} = 1416 \text{ tr/min.}$$

$$W_s = 2. \Pi. f = 2.3, 14.47,2 = 296, 4 \text{ rd/s.}$$

$$\Omega_s = \frac{W_s}{P} = 148,2 \text{ rd/s.}$$

$$g = \frac{W_r}{W_s} = \frac{6,28}{296,4} = 0,021$$

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \implies N = N_s (1-g) = 1416(1-0,021) = 1386 \text{ tr/min}$$

- Pour $f_3 = 44,67 \text{ (Hz)}$.

$$N_s = \frac{60.f}{p} = \frac{60.44,67}{2} = 1340 \text{ (tr/min).}$$

$$W_s = 2. \Pi. f = 281 \text{ rd/s}$$

$$g = \frac{W_r}{W_s} = \frac{6,28}{281} = 0,022.$$

$$N = N_s (1-g) = 1340 (1-0,022) = 1310 \text{ tr/min}$$

- Pour $f_4 = 40$ (Hz).

$$N_s = \frac{60.f}{p} = 1200 \text{ tr/min}$$

$$W_s = 2. \Pi. f = 2.3, 14.40 = 251, 2 \text{ rd/s.}$$

$$\Omega_s = \frac{W_s}{P} = 125,6 \text{ rd/s.}$$

$$g = \frac{W_r}{W_s} = \frac{6,28}{251,2} = 0,025.$$

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \implies N = N_s (1-g) = 1200(1-0,025) = 1170 \text{ tr/min.}$$

- Calcul la puissance absorbée par la pompe pour $N=1386\text{tr/mn.}$

$$P_1 = \frac{Q1.H1.\zeta.g}{\eta.3600} = \frac{279,1.41,54.0,814.9,81}{0,8.3600} = 32,14 \text{ kw}$$

- Calcul la puissance absorbée par la pompe pour $N=1310 \text{ tr/mn.}$

$$P_2 = \frac{Q2.H2.\zeta.g}{\eta.3600} = \frac{174,3.45,92.0,814.9.81}{0,8.3600} = 22,19 \text{ kw.}$$

- Calcul de la consommation de la pompe pour $N=1480\text{tr/mn.}$

$$C = \frac{P}{Q} = \frac{35,92.10^3}{345,5} = 103, 9 \text{ (w/m}^3\text{).}$$

- Calcul de la consommation de la pompe pour $N=1386 \text{ tr/mn.}$

$$C_1 = \frac{P_1}{Q_1} = \frac{32,14 .10^3}{279,1} = 115,15 \text{ (w/m}^3\text{).}$$

- Calcul de la consommation de pompe pour $N = 1310 \text{ tr/mn.}$

$$C_2 = \frac{P_2}{Q_2} = \frac{22,19.10^3}{174,3} = 127,3 \text{ (w/m}^3\text{).}$$

- Calcul la puissance absorbée par la pompe pour $N=1620\text{tr/mn.}$

$$P_3 = \frac{Q3.H3.\zeta.g}{\eta.3600} = \frac{424,7.32,4.0,814.9,81}{0,8.3600} = 38,15 \text{ kw.}$$

- Calcul la puissance absorbée par la pompe pour $N=1170$ tr/mn.

$$P_4 = \frac{Q_4 \cdot H_4 \cdot \rho \cdot g}{\eta \cdot 3600} = \frac{67,5 \cdot 48,9 \cdot 0,814 \cdot 9,81}{0,8 \cdot 3600} = 9,15 \text{ kw.}$$

- Calcul de la consommation de la pompe pour $N=3240$ tr/mn.

$$C_3 = \frac{P_3}{Q_3} = \frac{38,15 \cdot 10^3}{424,7} = 89,82 \text{ (w/m}^3\text{)}.$$

- Calcul de la consommation de pompe pour $N = 2400$ tr/mn

$$C_4 = \frac{P_4}{Q_4} = \frac{9,15 \cdot 10^3}{67,5} = 135,5 \text{ (w/m}^3\text{)}.$$

V.1.6. Application des lois de similitudes de NPSH, Débit, Hauteur :

- Calcul de NPSHr :

- Pour $N=1480$ tr/min $NPSHr_0 = 2,4$ m.
- Pour $N=1386$ tr/min $NPSHr_1 = 2,4[1386/1480]^{1,6} = 2,16$ m.
- Pour $N=1310$ tr/min $NPSHr_2 = 2,16[1310/1386]^{1,6} = 1,97$ m.

- Les caractéristique $H=f(Q)$ de la pompe pour les vitesses de rotation

- $N = 1480$ tr/mn
- $N = 1386$ tr/mn

- $N = 1480$ tr/mn

$$Q_1 = Q_0[N_1/N_0] \implies Q_1 = Q_0[1386/1480]$$

$$H_1 = H_0[N_1/N_0]^2 \implies H_1 = H_0[1386/1480]^2$$

Q_1	0	62,7	162	259	321,4	394,9
H_1	44,19	42,54	39,95	36,13	33	28,18

- $N = 1386$ tr/mn

$$Q_2 = Q_1[N_2/N_1] \implies Q_2 = Q_1[1310/1386]$$

$$H_2 = H_1[N_2/N_1]^2 \implies H_2 = H_1[1310/1386]^2$$

Q_2	0	58,93	152,28	243,46	302,1	371,2
H_2	39,32	37,86	35,5	32,15	29,37	25

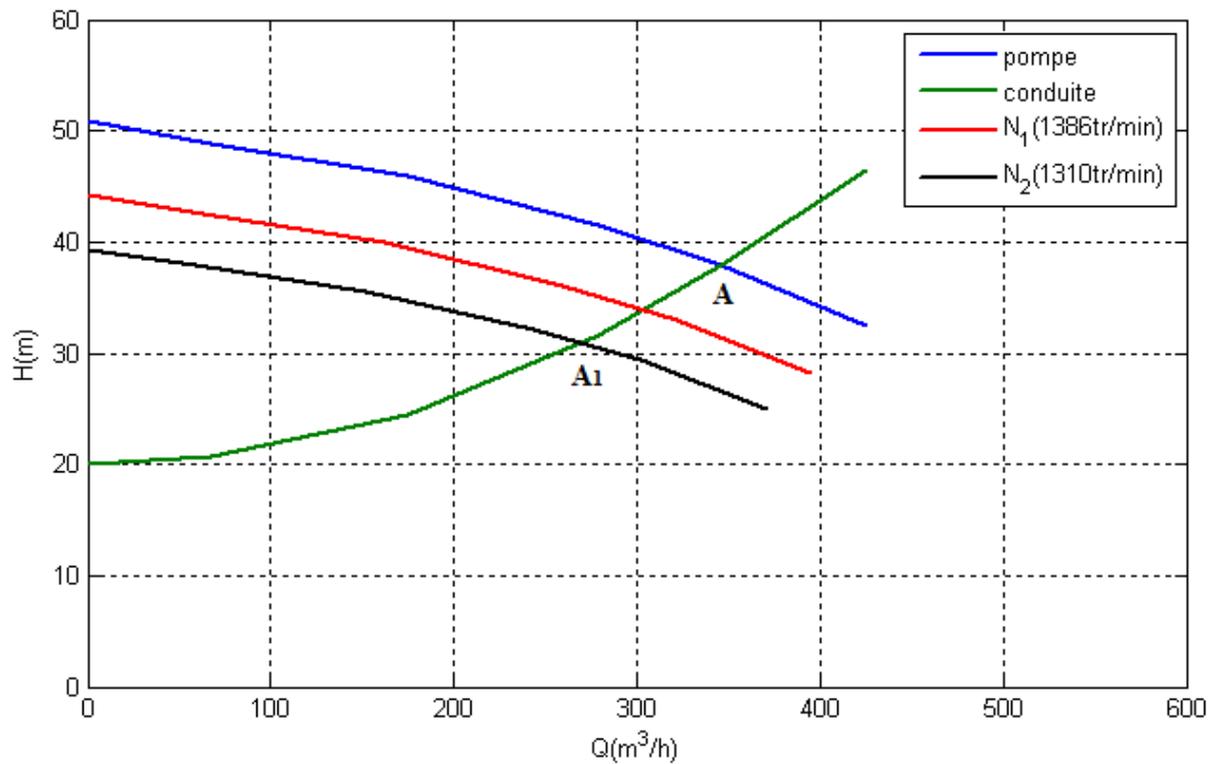


Figure. IV-7 : courbes caractéristiques de la pompe (variation de la vitesse).

Le point de fonctionnement de la pompe pour une vitesse de 1386 tr/mn :

$$Q = 279,1\text{m}^3/\text{h}, H = 41,54\text{m}$$

Le point de fonctionnement de la pompe pour une vitesse de 1310tr/mn

$$Q = 174,3 \text{ m}^3/\text{h}, H = 45,92\text{m}.$$

➤ **Vitesse fixe (vannage) :**

Q (m3/h)	Hmt(m)	N (tr/mn)	F(Hz)	η(%)	P (kw)	C (w/m ³)
345,6	37,9	1480	50	80,98	35,92	103,9
279,1	41,54	1480	50	78,5	32,14	117,3
174,3	45,92	1480	50	63,14	28,11	161,2

Tableau. IV-6 : Test avec vanne.

➤ **Vitesse variable :**

Q (m3/h)	Hmt(m)	N (tr/mn)	F(Hz)	η(%)	P (kw)	C (w/m ³)
345,6	37,9	1480	50	80%	35,92	103,9
279,1	41,54	1386	47	80%	27,95	115,15
174,3	45,92	1310	44	80%	22,19	127,3

Tableau. IV-7 : Test avec variation de vitesse.

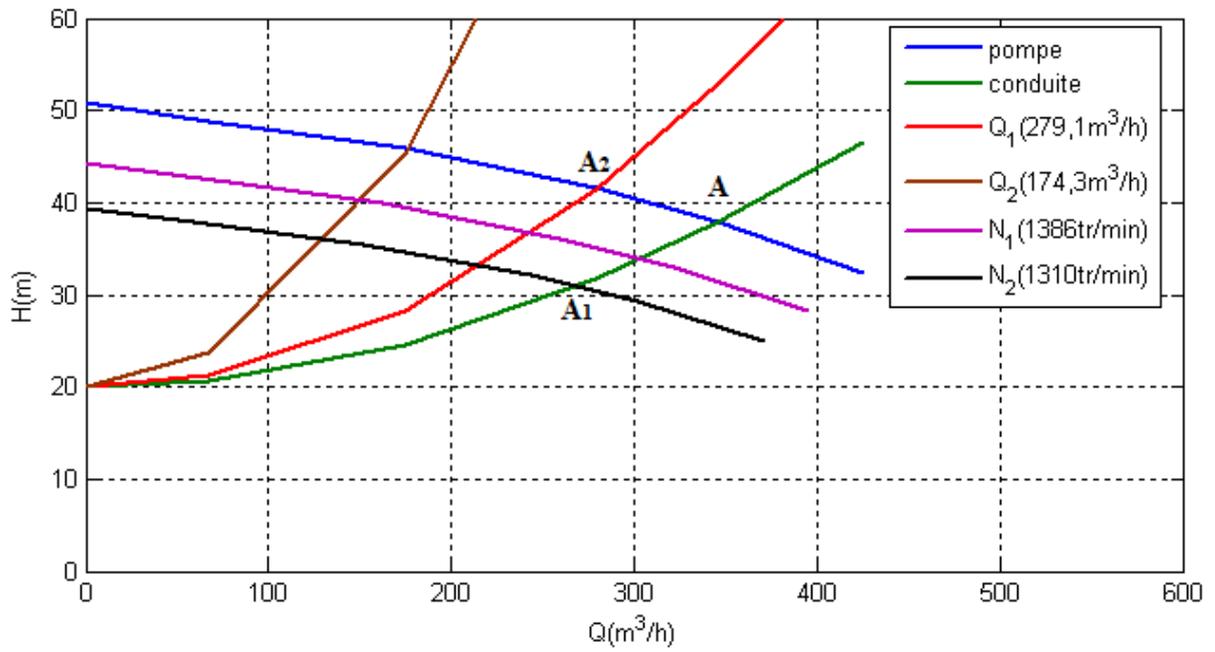


Figure. IV-8 : courbes caractéristiques de la pompe
(Variation de la vitesse + vanne de réglage).

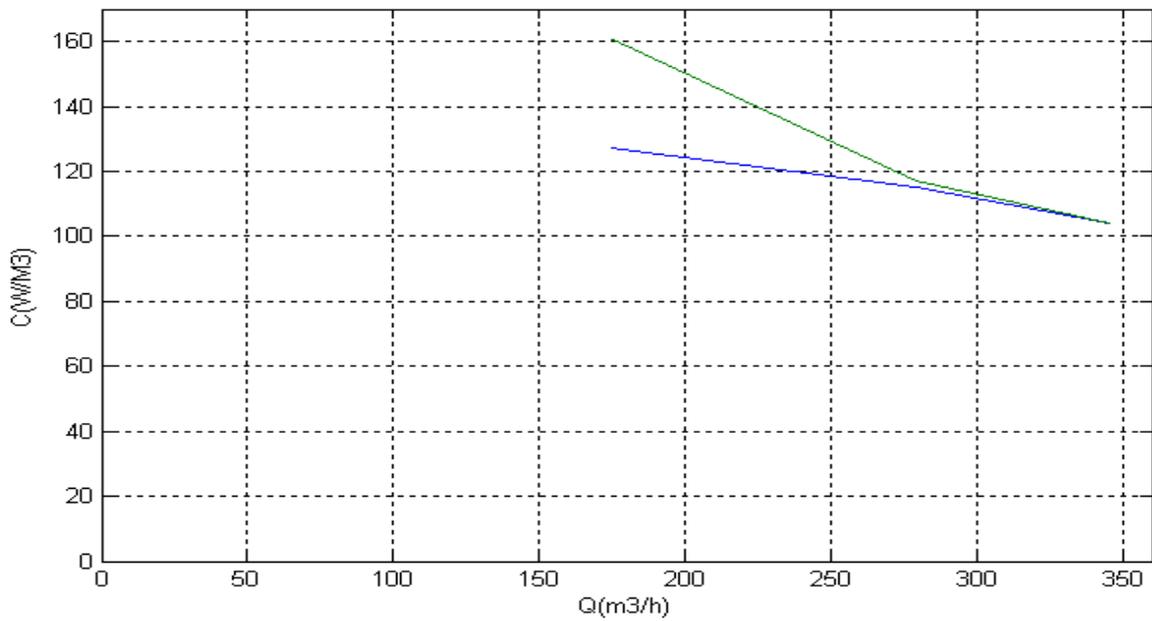


Figure. IV-9 : courbe de la consommation.

IV.2.Partie Simulation :

IV.2.1.Introduction :

Dans ce travail, la problématique envisagée consiste à maîtriser le fonctionnement d'une station de pompage équipée d'un moteur asynchrone entraînant une pompe centrifuge. Suite à l'évolution technologique, en particulier au niveau de l'électronique de puissance et de la microélectronique, il est devenu possible de mettre en œuvre des algorithmes de commande des systèmes électromécaniques à vitesse variable caractérisés par de hautes performances. Actuellement la simulation numérique est devenue un moyen inévitable qui permet d'analyser les synthèses les plus compliquées des phénomènes physiques, elle nous permet de voir leur comportement avec beaucoup de précision. Dans notre étude on a opté l'utilisation du logiciel MATLAB pour réaliser la simulation de système de pompage d'un réseau anti-incendie.

IV.2.2.Résultat de simulation du système sans la variation de vitesse :

Les paramètres de la machine asynchrone utilisée dans la programmation sont donnés au partie calcul.

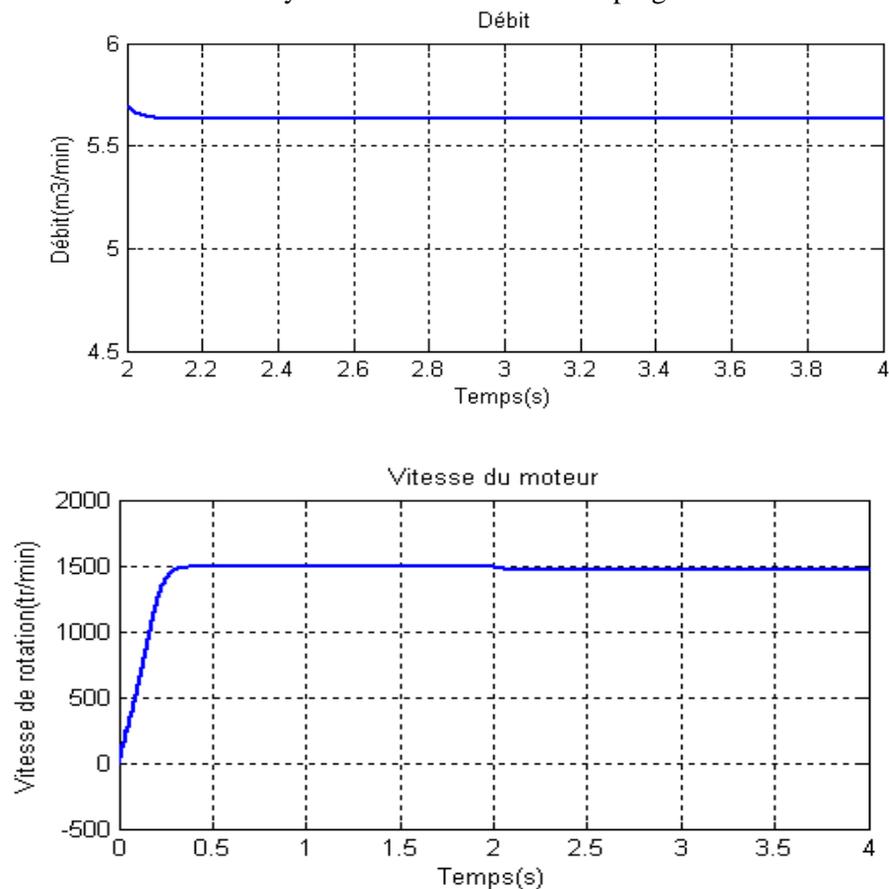


Figure. IV-10 : Débit de la pompe correspond à une vitesse de 1480 tr/min.

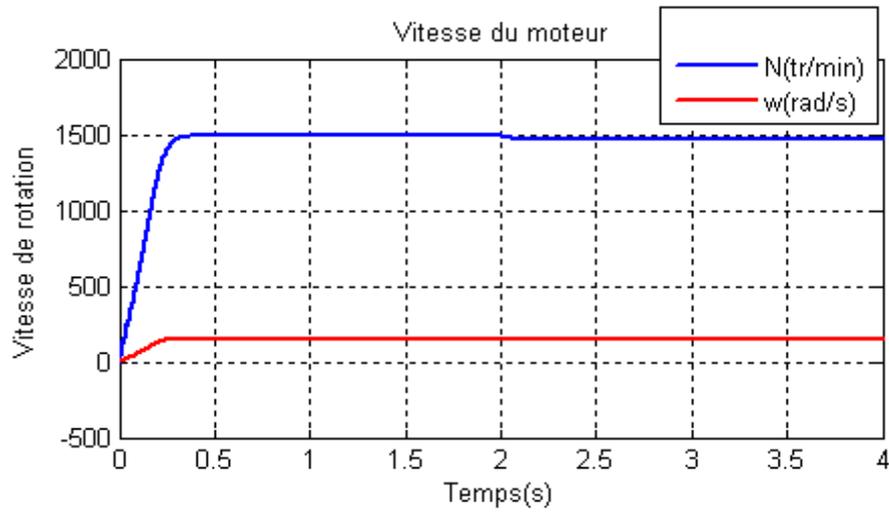


Figure. IV-11 : vitesse de rotation et vitesse angulaire du moteur dans un fonctionnement à vide et sous charge (charge appliquée à l’instant $t = 2\text{s}$).

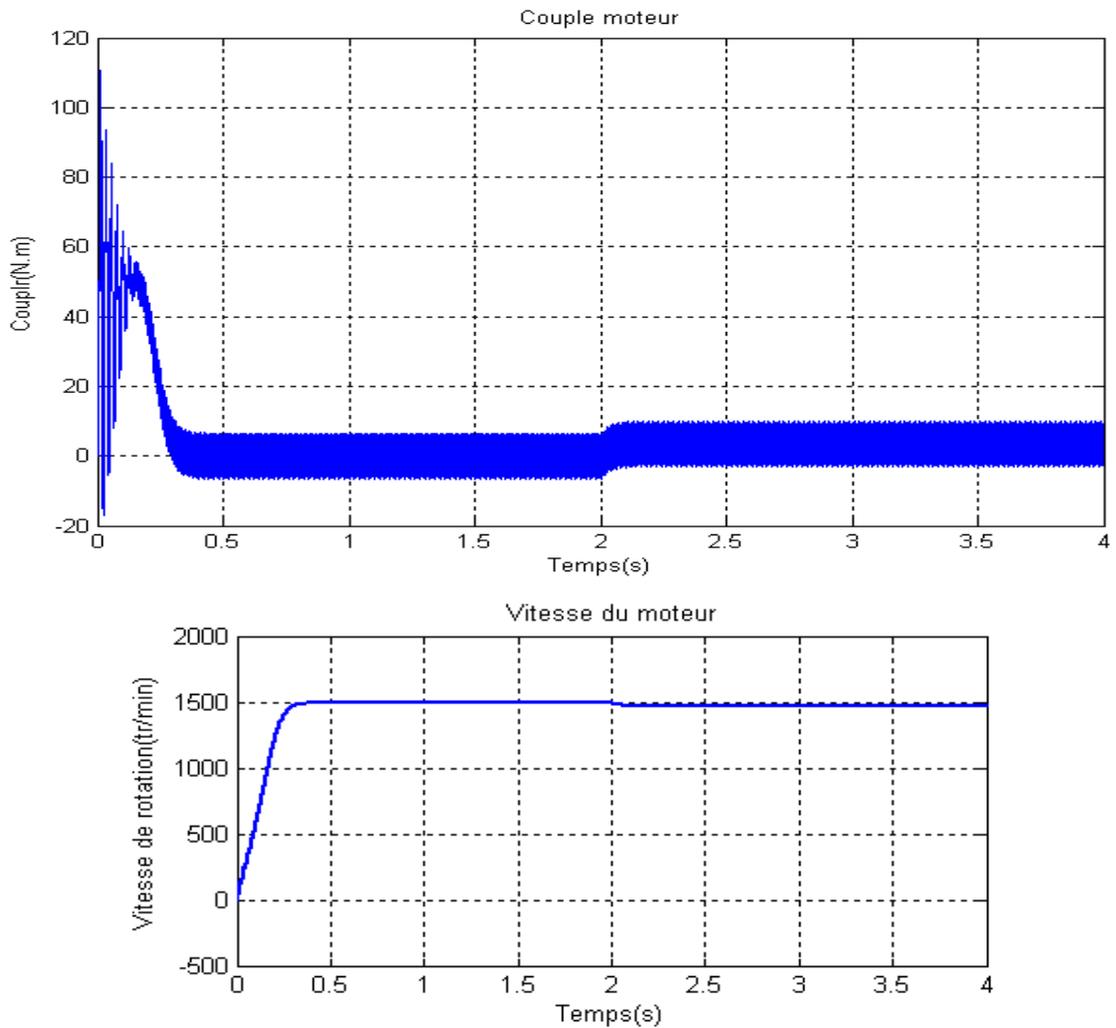


Figure. IV-12 : Couple moteur et vitesse angulaire du moteur dans un fonctionnement à vide et sous charge (charge appliquée à l’instant $t = 2\text{s}$).

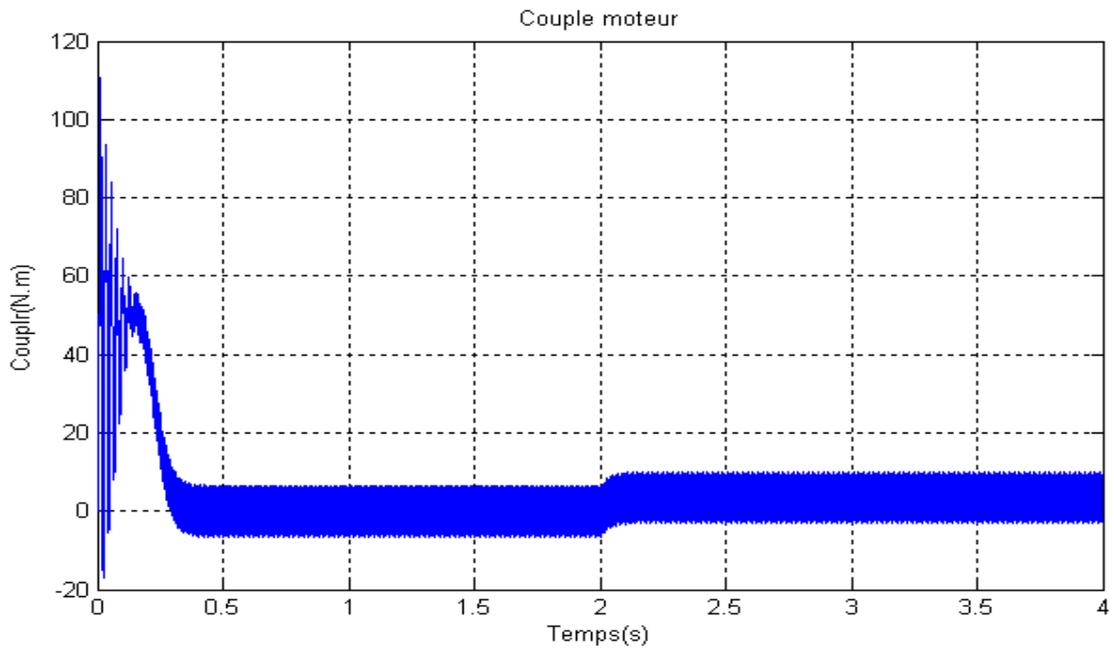


Figure. IV-13 : Couple moteur dans le fonctionnement à vide et sous charge (charge appliquée à l'instant $t = 2s$).

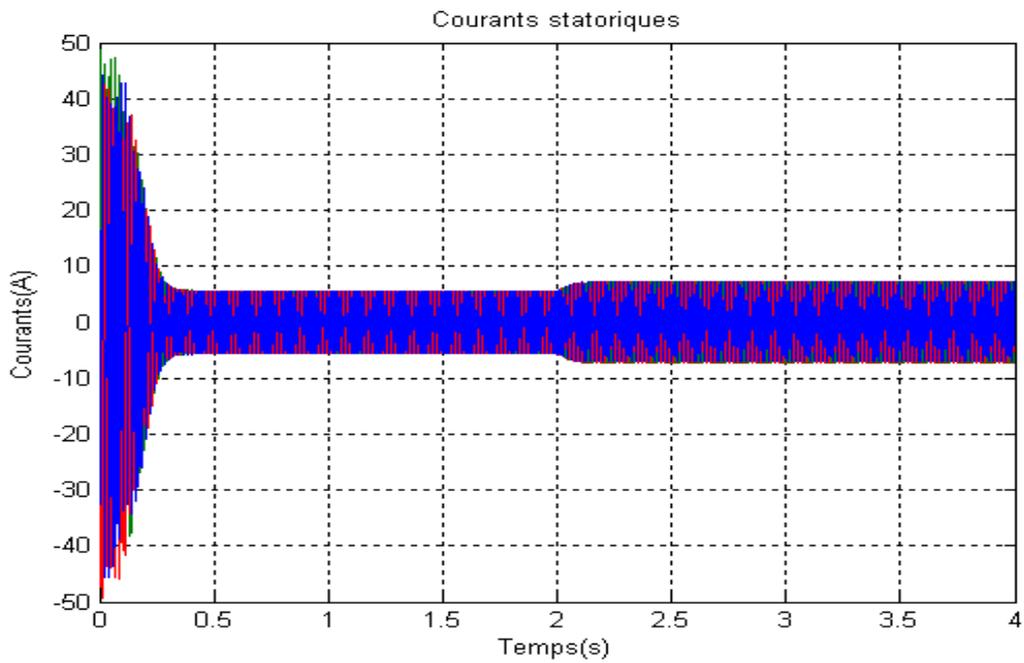


Figure. IV-14 : Courants statoriques fonctionnement à vide et sous charge (charge appliquée à l'instant $t = 2s$).

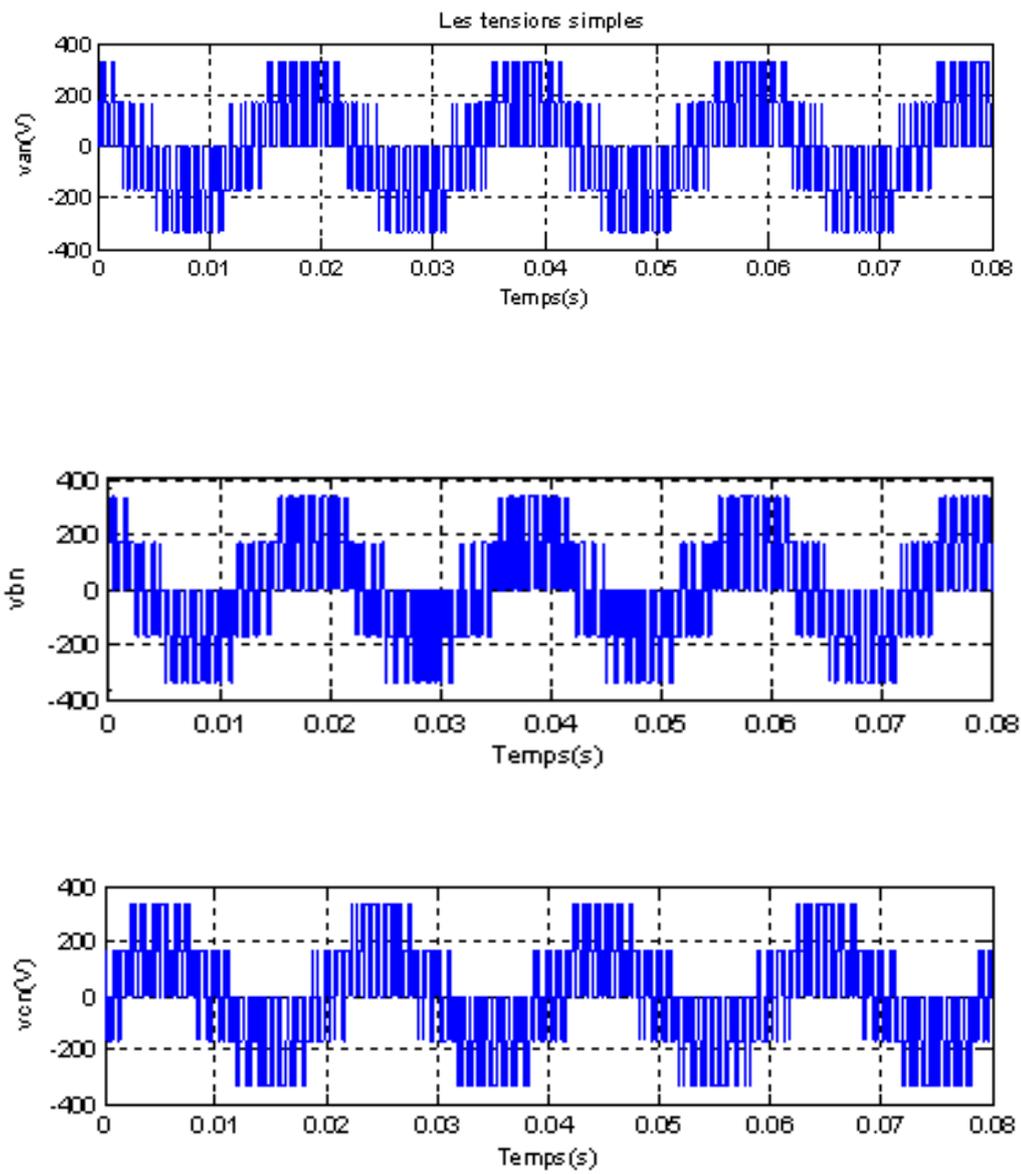


Figure. IV-15 : Tension simple des 3 phases (fonctionnement sous charge).

Discussion :

La figure (IV-10) montre la relation de la vitesse de rotation de la pompe avec son débit, ou on peut voir un débit égale à $(345,6\text{m}^3/\text{h})$ pour une vitesse de $(1480\text{tr}/\text{min})$. On peut voir également à partir de ces allures et celle de la figure (IV-11) la baisse de la vitesse du moteur au moment où on introduit la charge (la pompe centrifuge). Parallèlement on constate l'accroissement de la courbe couple moteur (électromagnétique) à l'instant $t=2\text{s}$, dans les figures (IV-12), (IV-13), cela prouve que le couple est inversement proportionnel à la vitesse du moteur, mais il est proportionnel au courant statorique du moteur comme le montre la figure (IV-14).

La figure (IV-15) représente l'allure des tensions simples des trois phases du moteur fonctionnant en charge.

IV.2.3.Résultat de simulation du système avec la variation de vitesse :

Après l'application de l'entraînement à vitesse variable on les résultats de simulation suivante.

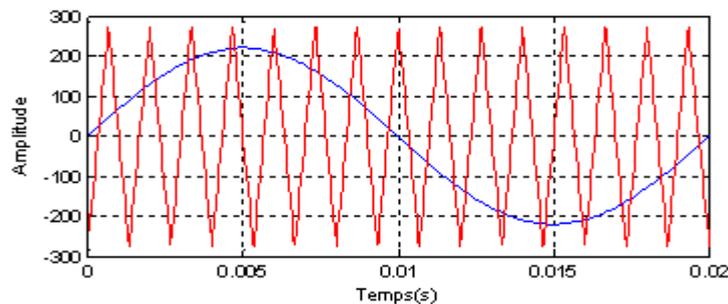


Figure. IV-16 : Représentation de la porteuse et la référence et détermination des instants de commutation de la commande MLI pour notre système.

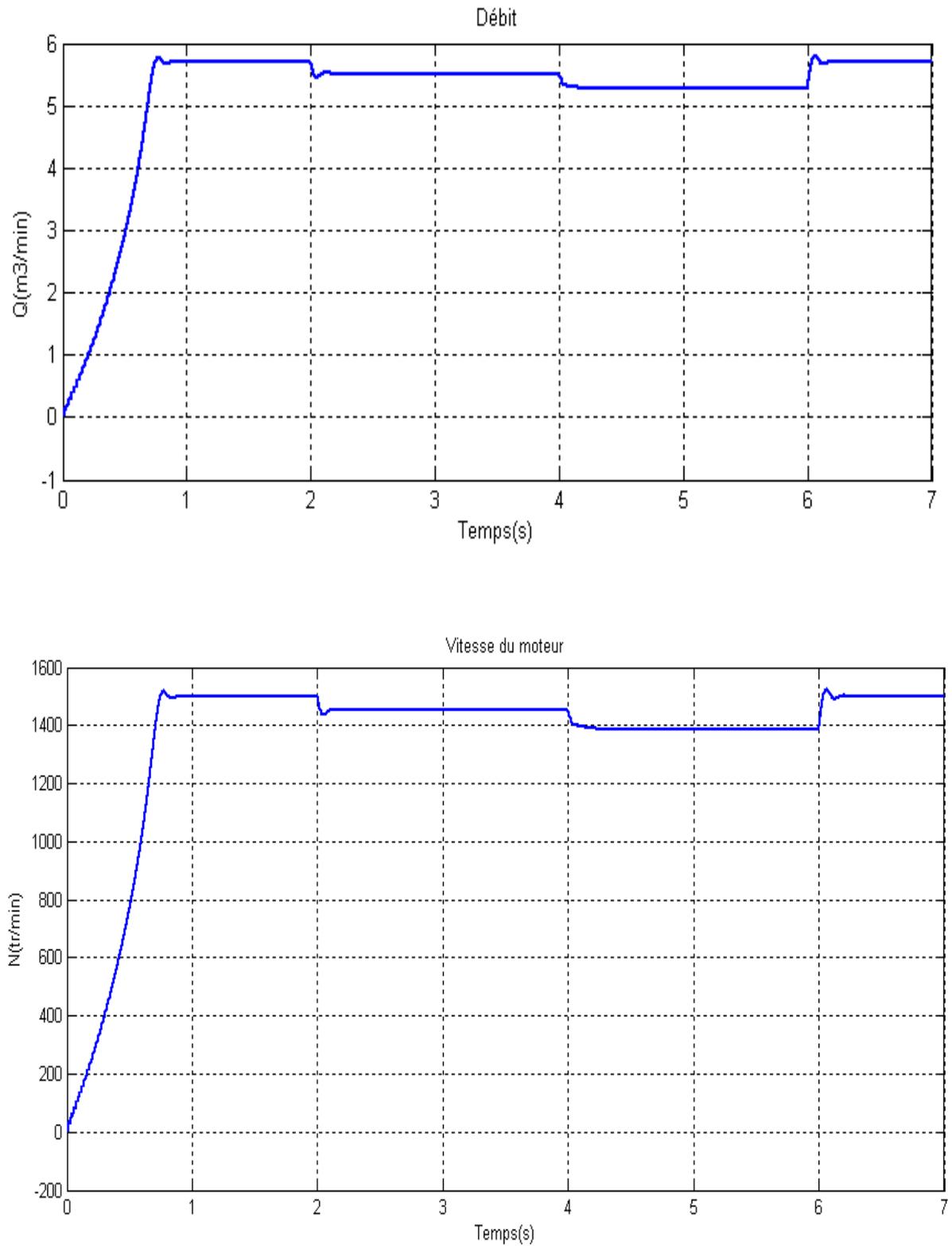


Figure. IV-17 : Variation de vitesses de la pompe correspond à la variation de son débit.

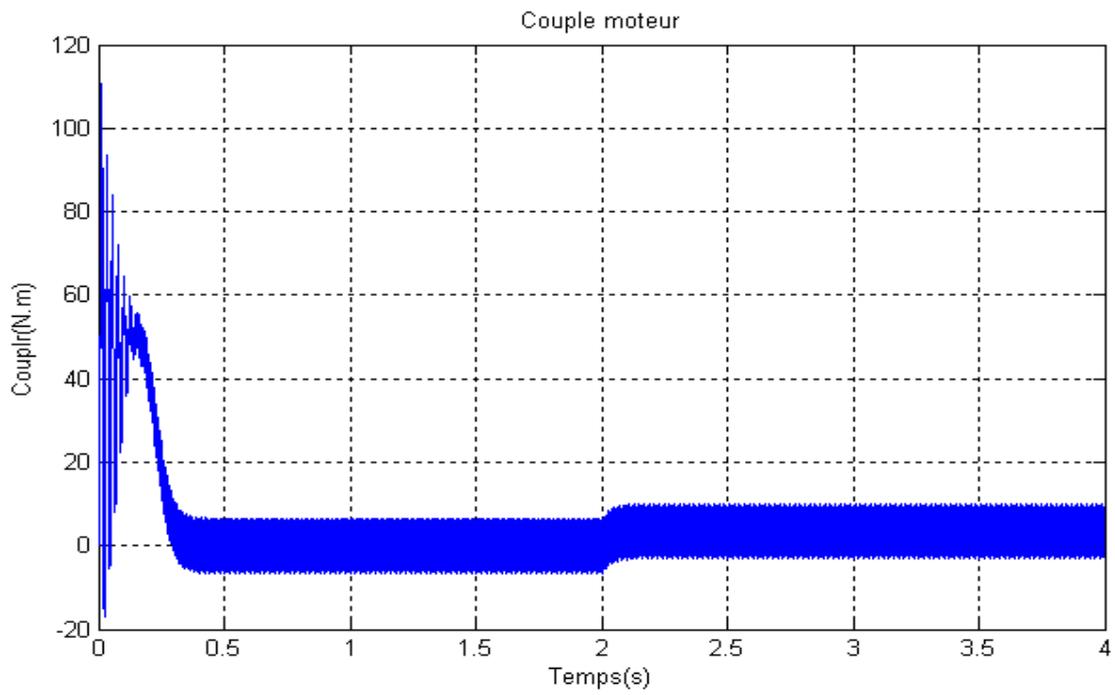


Figure. IV-18 : Couple du moteur qui fonctionne sous charge avec variation de vitesse.

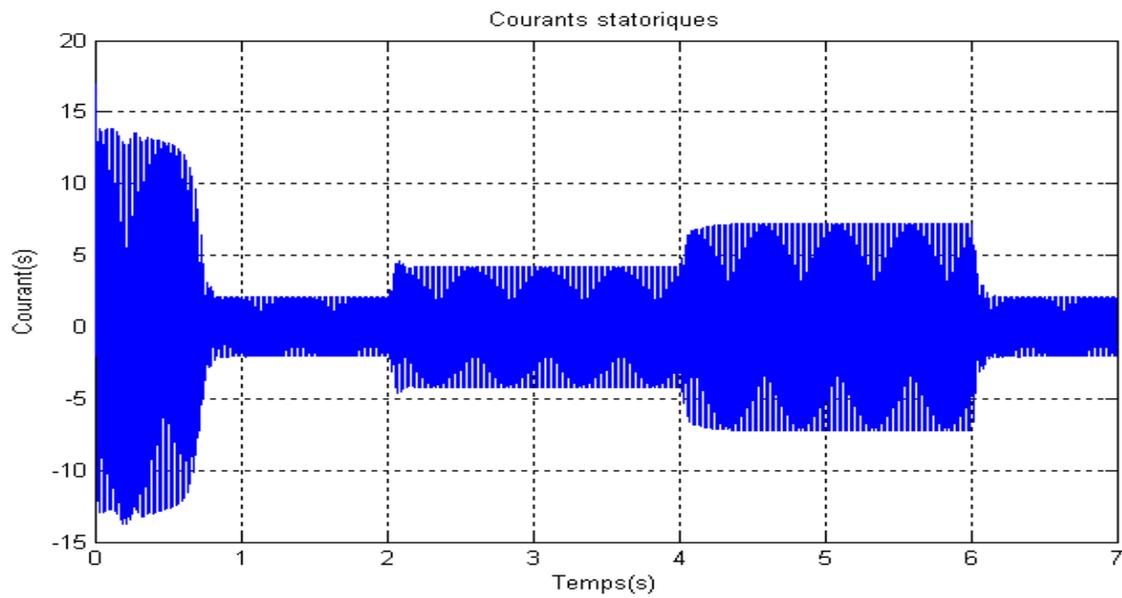


Figure. IV-19 : Courant statorique du moteur qui fonctionne sous charge avec variation de vitesse.

Discussion :

La figure (IV-17) présente bien la variation de la vitesse de la pompe en fonction de la variation de son débit.

La simulation nous a permis aussi de voir la variation du couple moteur en fonction de la vitesse de la pompe et qu'il est inversement proportionnel à cette dernière et au débit. Cela est très clair dans figure (IV-18)

Le courant statorique résulte de cette variation de vitesse est illustré dans figure (IV-19) qui proportionnel au couple moteur évoluant avec la variation du débit de la pompe.

V.2.4.Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons étudié les deux méthodes de réglage du débit des pompes centrifuges plus l'élaboration du modèle mathématique de chaque partie pour ce système de pompage, à l'aide de logiciel MATLAB/Simulink. La simulation présente bien la variation de la vitesse de la pompe en fonction de la variation de son débit. Et pour obtenir un entraînement à vitesse variable nous avons utilisé la commande MLI à l'aide de la variation de la tension et la fréquence de sortie de l'onduleur. Afin de tester la validité du modèle mathématique adopté (modèle de Park).

Les résultats obtenus s'avèrent très satisfaisants, ce qui nous permet de conclure que le modèle adopté arrive bien à approcher la réalité malgré les simplifications faites lors de la phase de modélisation.

Conclusion générale

Les pompes centrifuges sont largement utilisées en raison de leur fonctionnement relativement simple et leur prix raisonnable, elles consomment environ 20% de l'énergie dans le monde entier. L'étude présentée dans ce mémoire nous a permis de constater que le réglage du débit des pompes par la variation de vitesse est meilleur que le réglage par vannage, elle permet d'avoir un bon rendement de la pompe.

Dans les quatre chapitres premiers nous avons étudié tous les points fondamentaux concernant les pompes centrifuges et les modes de variation de débit, les moteurs synchrones et asynchrones et leurs principes de fonctionnement et les domaines d'utilisation, les convertisseurs des fréquences pour la variation de vitesse des moteurs asynchrone bien qu'ils offrent un rendement très élevés, ils permettent un excellent contrôle de la vitesse et ils présentent moins de pertes. Pour les onduleurs de tension, la technique MLI est un point de passage obligé pour pouvoir effectuer les réglages de la fréquence à partir d'une source de tension et de la fréquence fixe.

Dans le cinquième chapitre, nous avons étudié la modélisation dynamique de la machine asynchrone. Les résultats obtenus suite à cette simulation montre bien la validité de modèle étudié. Nous avons modélisé l'onduleur de tension qui nous a permis d'obtenir un entraînement à vitesse variable.

Finalement, on a étudié et analysé le système motopompe. Pour justifier notre proposition de variation de vitesse du moteur d'entraînement, on a choisi le variateur de vitesse d'après la puissance du moteur. Puis on a procédé à la simulation de l'ensemble onduleur-moteur-pompe et nous avons exécuté le calcul d'après le logiciel MATLAB/Simulink pour obtenir des résultats satisfaisants et clairs confirmant que l'utilisation de l'entraînement à vitesse variable des pompes centrifuges est une meilleure solution.

Bibliographie

-
- [1] « Machine électromagnétique », www.elec.jbd.free.fr.
- [2] Luc Lasne, Notions de base et machine électrique, Dunod, Paris, 2005.
- [3] Fabrice DESCHAMP, « Cours BAC S SI – Convertir L'énergie – Machine à Courant Continu » Sciences de L'ingénieur, LYCEE JACQUES PREVERT.
- [4] Amine AYAD, « Etude et réalisation d'une commande MLI pilotant un hacheur série », Mémoire de Master, Université Abou BekrBelkaid Tlemcen, 2014.
- [5] Mr ZEMOURI Azeddine, « Etudes expérimentales d'un convertisseur DC/DC contrôlé par une commande robuste », Mémoire de Magister, Université de Batna, 2014.
- [6] BRAHIMI Abdelkrim et GUEZOULI Housseine, « Etude et réalisation d'une carte de commande à base d'un microcontrôleur PIC 16F877 pour ponts redresseurs triphasés à thyristors », Mémoire de Master, Université Abou-BekrBelkaïd Tlemcen, 2014.
- [7] M.L.LOUAZENE, « Cours d'électroniques de puissance », université d'Ouargla, 2011.
- [8] Adel SAID et Yassine JEMAI, « Installation industrielles », Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Nabeul, 2013.
- [9] KRAMA Abdelbasset et GOUGUI Abdelmoumen, « Etude et réalisation d'une carte de contrôle par Arduino via le système Android », Mémoire de Master, université d'Ouargla, 2015.
- [10] Serial – How can I communicate from Arduino to MATLAB Arduino stack Exchange, www.arduino.stakexchange.com.
- [11] Ahmed misbah Youssef, PUMP TECHNOLOGY,
- [12] MACHINES HYDRAULIQUES Classification et Définitions ; www.almohandiss.com
- [13] Formation TOTAL: MAINTENANCE MECANIQUE LES POMPES
Manuel de formation EXP-MN-SE090-FR
Dernière révision: 26/11/2008
- [14] Philippe Ladoux : « variation de vitesse des machines à courant alternatif », réseau national de ressources en électrotechnique, 1992.
- [15] www.Scribd.com/doc/47470952/hydraulique.
- [16] Catalogue ABB Automation Paris 2001-2002.

Annexe

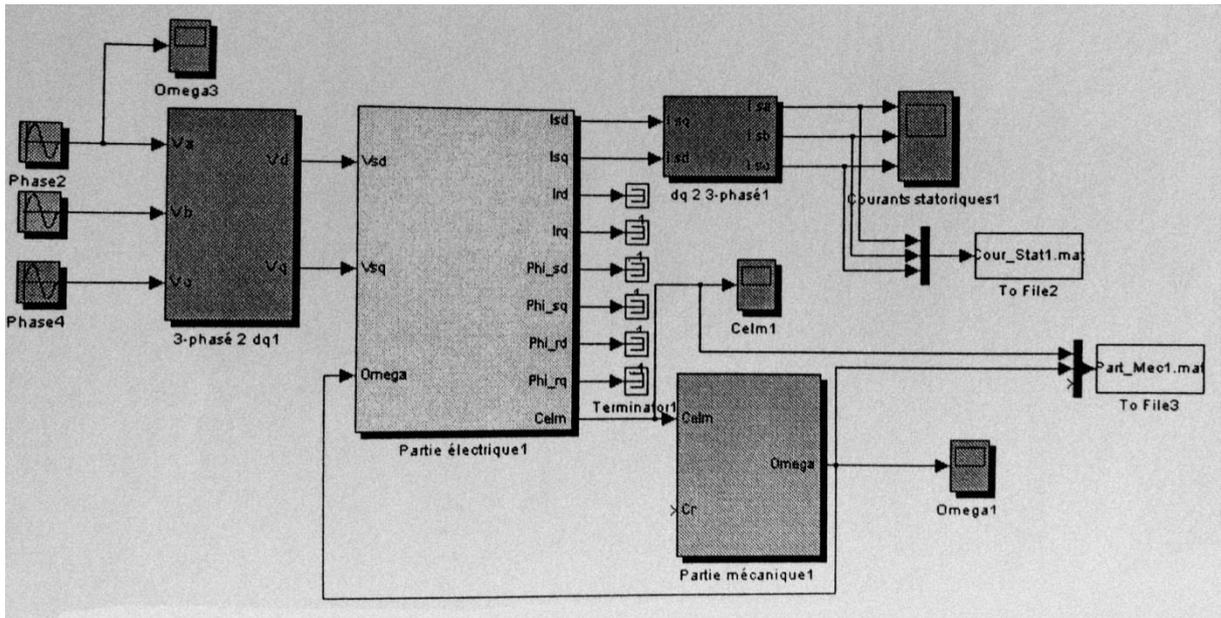
Tableau N° 01 : Pertes de charge dans les tuyaux d'acier.

Tuyau		Q m ³ /h	1	3	6	9	12	18	24	30	36	42	48	60	90	120	180	240	300	360	420
		Q l/min	16	50	100	150	200	300	400	500	600	700	800	1000	1500	2000	3000	4000	5000	6000	7000
G 1"	DN 25	2,7	21	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,6	1,7																		
G 1" 1/4	DN 32	0,7	5,5	22	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,35	1	2,1																	
G 1" 1/2	DN 40	-	1,8	7	14	23	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,7	1,35	1,9	2,5																
G 2"	DN 50	-	0,5	2,2	4	8	17	28	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,4	0,8	1,25	1,5	2,5	3,2														
G 2" 1/2	DN 65	HL	-	-	0,6	1,2	2,1	4,2	8	12	17	22	28	-	-	-	-	-	-	-	-
		v			0,5	0,75	1	1,4	2	2,5	3	3,4	4								
	DN 80	-	-	-	-	0,8	1,6	2,8	4,2	6,5	7,5	10,5	15	-	-	-	-	-	-	-	-
		0,7	0,95	1,25	1,6	2	2,1	2,6	3,3												
	DN 100	-	-	-	-	-	0,55	0,9	1,4	2	2,4	3,5	5	11	20	-	-	-	-	-	-
		0,6	0,8	1,1	1,25	1,4	1,6	2	3,2	4											
	DN 125	m/100m	-	-	-	-	-	-	-	-	0,9	1,2	1,8	4	6,5	15	-	-	-	-	-
		m/s									0,95	1,1	1,4	2	2,7	4					
	DN 150	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,6	1,5	2,5	5	8	14	-	-	-
		0,9	1,4	1,7	2,7	3,5	4,8														
	DN 200	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,4	0,6	1,3	2	3,5	4,6	6,5	-
		0,8	1	1,6	2	2,6	3	3,5													
	DN 250	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,4	0,7	1,1	1,6	2	-
		1	1,3	1,6	2	2,3															
	DN 300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,3	0,45	0,7	0,9	-
		0,9	1,25	1,4	1,6																

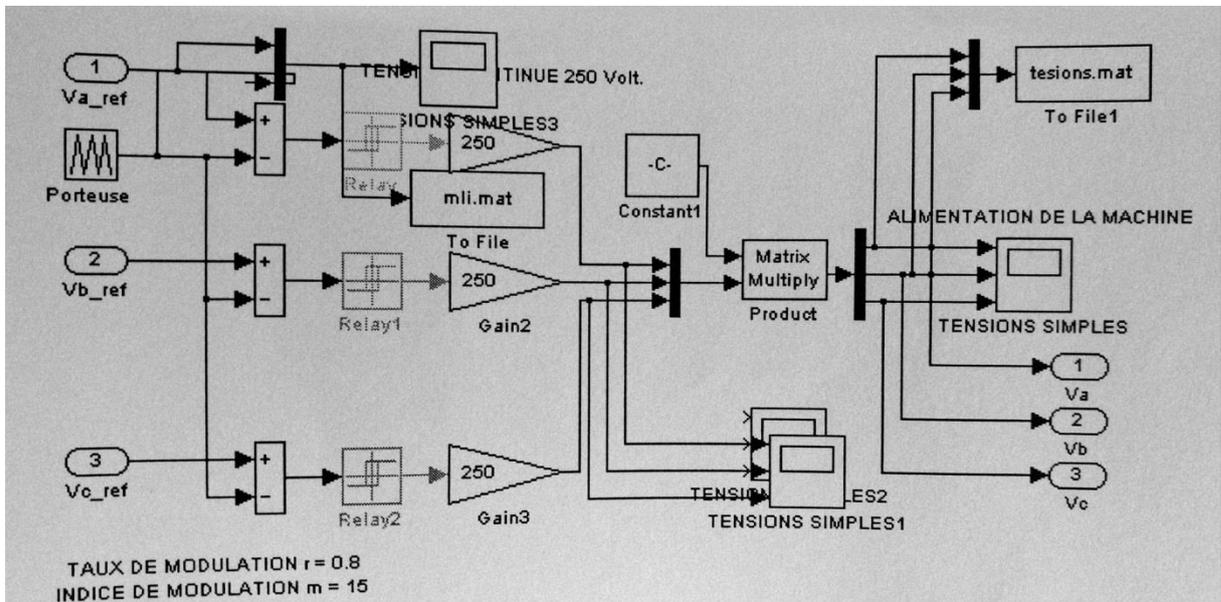
Tableau N° 02 : Pertes de charges en cm pour les courbes vannes, clapet de pied et clapet de non-retour.

Vitesse de l'eau m/sec	Courbes à angle vif α					$\alpha = 90^\circ$ courbes à angle arrondi					Vannes standard	Clapets de pied	Clapets de non retour
	$\alpha = 30^\circ$	$\alpha = 40^\circ$	$\alpha = 60^\circ$	$\alpha = 80^\circ$	$\alpha = 90^\circ$	$\frac{d}{R} = 0,4$	$\frac{d}{R} = 0,6$	$\frac{d}{R} = 0,8$	$\frac{d}{R} = 0,1$	$\frac{d}{R} = 1,5$			
0,4	0,43	0,52	0,71	1,0	1,2	0,11	0,13	0,16	0,23	0,43	0,23	32	31
0,5	0,67	0,81	1,1	1,6	1,9	0,18	0,21	0,26	0,37	0,67	0,37	33	32
0,6	0,97	1,2	1,6	2,3	2,8	0,25	0,29	0,36	0,52	0,97	0,52	34	32
0,7	1,35	1,65	2,2	3,2	3,9	0,34	0,40	0,48	0,70	1,35	0,70	35	32
0,8	1,7	2,1	2,8	4,0	4,8	0,45	0,53	0,64	0,93	1,7	0,95	36	33
0,9	2,2	2,7	3,6	5,2	6,2	0,57	0,67	0,82	1,18	2,2	1,20	37	34
1,0	2,7	3,3	4,5	6,4	7,6	0,7	0,82	1,0	1,45	2,7	1,45	38	35
1,5	6,0	7,3	10	14	17	1,6	1,9	2,3	3,2	6	3,3	47	40
2,0	11	14	18	26	31	2,8	3,3	4,0	5,8	11	5,8	61	48
2,5	17	21	28	40	48	4,4	5,2	6,3	9,1	17	9,1	78	58
3,0	25	30	41	60	70	6,3	7,4	9	13	25	13	100	71
3,5	33	40	55	78	93	8,5	10	12	18	33	18	123	85
4,0	43	52	70	100	120	11	13	16	23	42	23	150	100
4,5	55	67	90	130	160	14	21	26	37	55	37	190	120
5,0	67	82	110	160	190	18	29	36	52	67	52	220	140

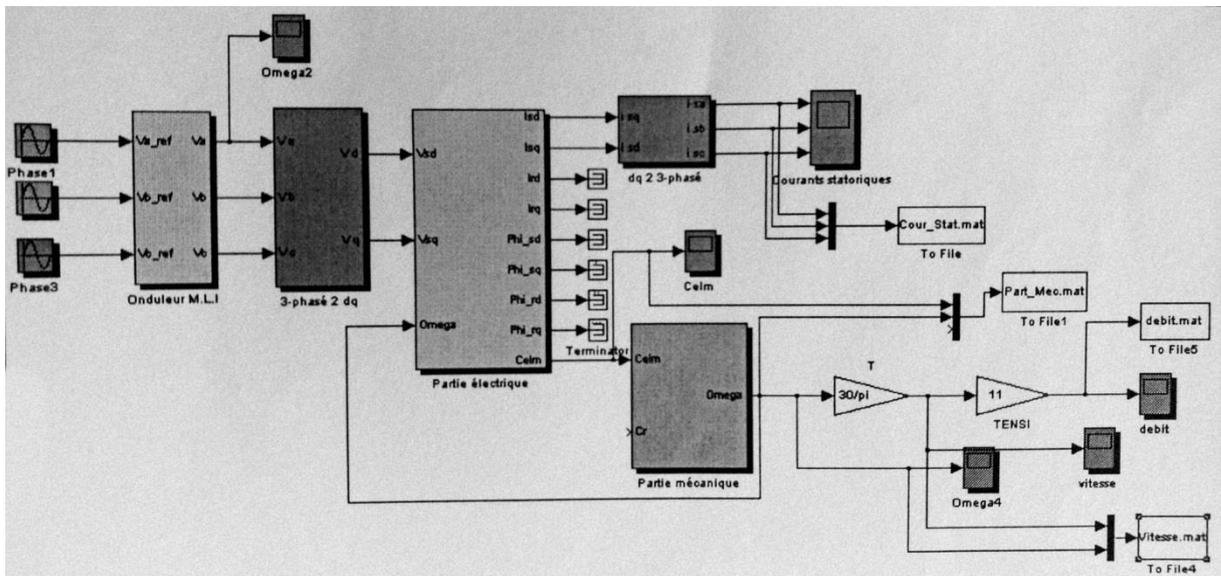
Bloc de simulation : La machine asynchrone.



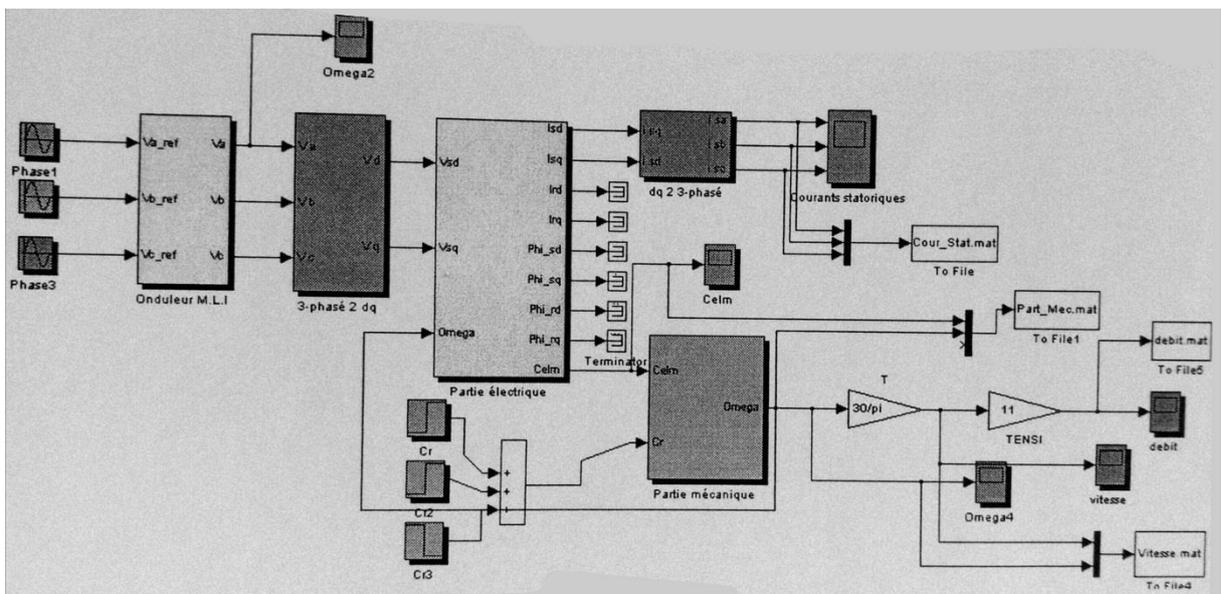
Modèle onduleur de tension triphasé avec la commande MLI



Bloc de simulation : L'association moteur asynchrone-Onduleur MLI.



Bloc de simulation : Système de pompage.



ملخص

في السنوات الأخيرة ظهرت معايير جديدة للتحكم في المحركات الكهربائية و هذه المعايير سمحت لنا في اقتصاد الطاقة وكذا تقليص المساحات مع ربح الوقت. من بين هذه المعايير استبدال النظام الكلاسيكي للتحكم في تدفق المضخات المركزية بنظام عصري ألا و هو مبدل السرعة بنموذج تغيير طول الموجة و هذا ما يجعلنا نغير سرعة المحرك بدلالة التواتر ومنه تغيير تدفق المضخة، حيث نستعمل برنامج المحاكاة الرياضي لمعرفة مدى نجاعة النتائج المتحصل عليها و في الأخير تأكدنا بأن تغيير تدفق المضخة عن طريق تغيير سرعة المحرك باستعمال مبدل السرعة هي من أفضل الطرق العصرية و خاصة أنها بأقل تكلفة.

الكلمات المفتاحية : محركات التيار المتناوب، المحولات الثابتة، تقنية MLI

Résumé

Ces dernières années, nouveaux critères de choix dans les entraînements électriques ont été émergés. Ces critères : économie d'énergie, réduit l'espace de travail...etc. Le présent travail donne les résultats d'une étude approfondie sur l'efficacité énergétique avec une mise en évidence des effets positifs de l'introduction à plus grande échelle des entraînements à vitesse variable. L'étude du débit des pompes centrifuges (par vannage et variation de vitesse) présente l'avantage de ce dernier, parmi les convertisseurs de fréquence utilisées pour la variation de la vitesse des moteurs asynchrones, nous avons choisi l'onduleur de tension MLI, car c'est une technologie de référence pour toutes les applications industrielles de fiable et moyenne puissance, il offre une grande souplesse de fonctionnement et il est moins cher et cela nous permet de varier la vitesse du moteur qui à son tour entraîne la variation du débit de la pompe. Ceci nous a amené à introduire un programme mathématique de simulation qui détermine l'efficacité des résultats obtenus.

Mots clés : Machine à courant alternatif, les convertisseurs statiques, la technique MLI.

Abstract

In recent years, a new standards of controlling electric motors have emerged. These criteria allowed us to save energy and reduce the working space. This paper shows the results of a comprehensive study on energy efficiency with a demonstration of positive effects in the introduction of variable speed workouts. The study of the flow rate of the centrifugal pumps (by winnowing and speed control) including frequency converters used for the varying the speed of asynchronous motors, has the advantage. So, we chose the inverter PWM, because it is a leading technology for all industrial applications of a low and medium power, it offers great operational flexibility and it's cheaper. Indeed, it allows us to vary the motor speed, which in turn leads the variation in pump flow. This led us to introduce a mathematical simulation program that determines the effectiveness of the results.

Keywords: AC machine, static converters, PWM technique.