



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITÉ KASDI MERBAH OUARGLA



Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE MASTER ACADEMIQUE

Domaine: Sciences Techniques

Filière: Génie mécanique

Spécialité: Maintenance Industrielle

Présenté Par :

Adel Ben Aicha

Tamim Defrour

Réglage des paramètres des pompes centrifuge à vitesse variable

Soutenu Juin 2019

Devant le jury composé de:

K.Rouagdia

UNIVERSITE D'OUARGLA

Président

R.KAREK

UNIVERSITE D'OUARGLA

Examineur

R.Khittabi

UNIVERSITE D'OUARGLA

Encadreur

ANNEE UNIVERSITAIRE 2018 / 2019

Dédicaces

Pour ma mère, à mon père ..

Pour tous mes frères ..

Pour tous ceux qui étaient prêts à nous enseigner ..

Pour tous les amis ..

Je dédie ce travail.

REMERCIEMENTS

*En premier lieu, nous tenons à remercier notre ALLAH,
notre créateur pour nous avoir donné la force pour
accomplir ce travail.*

*Je remercie infiniment M.Khettabi Rim , 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 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	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur les pompes	
I.1.Introduction	3
I.1.1- Classification des pompes centrifuges	3
I.1.2- Description et fonctionnement	4
I.2.1. Paramètres d'une pompe centrifuge	6
I.2.1.1. Le débit	6
I.2.1.2. Hauteur manométrique	7
I.2.2. caractéristiques d'une pompe	7
I.2.2.1. Puissance P	7
I.2.2.2. pertes	7
I.2.3.3 Rendement	8
I.2.4. Courbe caractéristique et point de fonctionnement	8
I.3.Les facteurs de dysfonctionnement des pompes centrifuges	9
I.3.1.Cavitation	10
I.3.2.NPSH -Hauteur nette absolue à l'aspiration	11
I.3.3. Utilisation	11
I.3.4. Avantages et inconvénients des pompes centrifuges	11
I.3.4.1 Avantages	12
I.3.4.2 Inconvénients	12
I.4.Conclusion	12
<i>Chapitre II: Méthodes de réglage des paramètres d'une pompe centrifuge</i>	
II.1-Introduction	14
II.2-Méthodes de réglage du débit d'une pompe centrifuge	14
II.2.1- Réglage du débit par laminage	14
II.2.2- Réglage du débit par vanne de réglage	15
II.2.2.1- Schématisation des vannes	16
II.2.2.2 –Situation	16
II.2.2.2.1 - Réglage de débit	16

II.2.2.2 .2- Réglage de niveau	16
II.2.2.2 .3- Réglage de pression	17
II.3- Réglage du débit par variation de la vitesse de rotation	20
II.3.1-Variation de vitesse des moteurs asynchrones	20
II.3.1.1-Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone	21
II.3.1.2- structure - principes de fonctionnement	21
II.3.1.2-Glisement	24
II.3.1.3-Bilan de puissance	24
II.4-Schéma équivalent	26
II.4.1-vitesses du moteur asynchrone	26
II.4.2-modes variation de vitesse d'un moteur asynchrone	26
II.5-Réglage de la vitesse des moteurs asynchrones par convertisseur statique	31
II.5.1-Action sur le nombre de paires de pôles	31
II.5.2- Action sur la fréquence de la tension d'alimentation statorique	31
II.5.3-Action sur le glissement	31
II.5.4-Action sur le nombre de paires de pôles	31
II.5.5- Action sur la fréquence de la tension statorique	33
II.6-Conclusion	40

Chapitre III: Modélisation et commande de l'installation moteur –pompe

III. 1.Introduction	42
III.2 Contrôle vectoriel	42
III.2.1 Modèle transitoire de la machine asynchrone	42
III.2.2.1 Hypothèses de travail	43
III.2.2.2 Les équations de la machine asynchrone en régime quelconque	43
III.2.2.3 Transformation de Park	46
III.2.2.4 Mise en équations de la machine asynchrone en coordonnées de Park	48
III.2.2 .4.1 Équation électriques	50
III.2.2.4.2 Relations entre flux courants	52
III.2.2. 5- Équations dans différents référentiels	55
III.2.2.5.1 Référentiel lié stator	55
III.2.2.5.2 Référentiel lié rotor	55
III.2.2.5.3 Référentiel lié au champ tournant	56
III.2.2. 5.4 Calcul couple	56
III.3.Modélisation de l'onduler tension	61

III.4. Modélisation de la pompe centrifuge	64
III.5. Conclusion	65

Chapitre IV : calcul sélectif des modes de réglage d'une pompe centrifuge

IV.1. Introduction	67
IV .2 Choix de la pompe centrifuge	67
IV .2.1 Calcule de la hauteur manométrique	67
IV.2.2 Détermination du point de fonctionnement	68
IV .3. Choix du moteur	70
IV .3. 1 Billon des puissances	71
IV .4. Réglage du débit	71
IV .4.1. Réglage du débit par vanne de réglage	72
IV.4.2 Réglage du débit par variation de vitesse du moteur d'entraînement	73
IV.2.Partie Simulation	
IV.2.1.Introduction	76
IV.2.2.Résultat de simulation pour le cas de vanne (sans variation de vitesse	76
IV.2.3. Résultat de simulation pour le cas de variation de vitesse	76
IV. 2.4.Conclusion	84
Conclusion général	86
Bibliographies	
Annexes	
Résumé	

List des figures

Figure I .1: Classification selon la forme de la roue	4
Figure. I .2 :Principaux éléments d'une pompe centrifuge	5
Figure I .3: courbe caractéristique d'une pompe centrifuge.	9
Figure II.1 : Évolution du point de fonctionnement et économie de puissance dans le cas d'un étranglement de pompes avec une courbe caractéristique de puissance croissante.	15
Figure II.2: R'égulation de d'ébit.	16
Figure II.3: Régulation de niveau.	17
Figure II.4 :Régulation de pression.	17
Figure II.5 : Fonctionnement d'une pompe à vitesse de rotation variable pour Différentes courbes caractéristiques de réseau, HA1 et HA2. (Économie de puissance, $\Delta P1$ et $\Delta P2$ pour demi-charge, Comparaison avec l'économie obtenu par laminage)	19
Figure II.6 : les trois bagues de l'arbre moteur d'une machine asynchrone à rotor bobiné.	21
Figure II.7 : rotor à cage d'écureuil, la cage vide de fer à gauche et emplie de rondelles de fer à droite.	21
Figure II.8 : rotor à cage d'écureuil, le rotor est en aluminium injecté et moulé sous pression sur les rondelles de fer celles-ci ont été éliminées avec de l'acide afin de rendre la cage d'écureuil parfaitement visible.	22
Figure II.9: L'aspect extérieur d'un rotor à cage ne permet pas de distinguer la cage d'écureuil pourtant bien présente à l'intérieur.	22
Figure II.10 : Plaque à bornes d'une machine asynchrone triphasée.	23
Figure II.11 : Couplage du stator en étoile d'une machine asynchrone triphasée.	23
Figure II.12 : Couplage du stator en triangle d'une machine asynchrone triphasée.	23
Figure II.13 : Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone.	24
Figure II.14 : Une machine asynchrone comporte le même nombre de pôles au rotor et pour une phase statorique.	24
Figure II.15 :Diagramme de bilan de puissance d'une machine asynchrone.	25
Figure III.1 : Représentation des enroulements statoriques et rotoriques d'une machine asynchrone à rotor bobiné.	43
Figure III.2 : Rotation du système $\alpha \beta$ vers le système d q.	46
Figure III.3. Représentation angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique.	48
Figure III.4 : Représentation de la machine asynchrone de Park.	49
Figure III.5: Principe du contrôle vectoriel.	58
Figure III.6.: Schéma de régulation de vitesse de machine asynchrone à flux rotorique orienté.	59
Figure III.7 :Bloc de simulation de la machine asynchrone.	61
Figure III.8 : Schéma équivalent d'un onduleur de tension triphasé.	62
Figure III.9 : Structure de la MLI Sinus-Triangle.	63

Figure III.10 : modèle de l'onduleur de tension triphasé avec la commande MLI.	63
Figure III.11 : bloc de simulation de l'association moteur asynchrone-onduleur MLI.	63
Figure III.12 : Modélisation de la pompe centrifuge.	64
Figure III.13: bloc de simulation de système de pompage.	65
Figure IV-1 : courbe caractéristique de la pompe.	68
Figure IV-2: courbe caractéristique de la conduite.	69
Figure IV-3 : Accouplement du groupe moteur – pompe.	70
Figure IV-4 : bilan des puissances d'un moteur asynchrone	71
Figure IV-5 : courbes caractéristiques de la conduite (Cas du vannage à vitesse fixe).	73
Figure IV-6 : courbes caractéristiques de la pompe (cas de variation de vitesse).	76
Figure. IV-7 : vitesse de rotation et vitesse angulaire du moteur dans un fonctionnement à vide et sous charge(charge appliquée à l'instant $t = 2s$)	77
Figure. IV-8 : Couple moteur et vitesse angulaire du moteur dans un fonctionnement à vide et sous charge (charge appliquée à l'instant $t = 2s$).	78
Figure. IV-9 : Couple moteur dans le fonctionnement à vide et sous charge charge appliquée à l'instant $t = 2s$	79
Figure. IV-10 : Courants statoriques fonctionnement à vide et sous charge (charge appliquée à l'instant $t = 2s$)	79
Figure. IV-11 : Tension simple des 3 phases (fonctionnement sous charge)	80
Figure. IV-12 : Représentation de la porteuse et la référence et détermination des- instants De commutation de la commande MAI pour notre système.	81
Figure. IV-13 : Variation de vitesses de la pompe correspond à la variation de son débit.	82
Figure. IV-14 : Couple du moteur qui fonctionne sous charge avec variation de vitesse.	83
Figure. IV-15 : Courant statorique du moteur qui fonctionne sous charge avec variation de vitesse.	83

List des tableaux

Tableau. IV-1 : $Q_1 = f(H_1)$ Caractéristique du circuit (réseau)	69
Tableau. IV-2 : Les données obtenues par le test de la pompe.	72
Tableau. IV-3: $Q_1 = f(H_1)$ Caractéristiques de la conduite	72
Tableau. IV-4 : $Q_2 = f(H_2)$.	73

Nomenclature

Alphabétique	latin
F [N]	La force
m [kg]	La masse
v [m/s]	La vitesse
t [s]	Le temps
M	Le moment S
[M ²]	La surface
R [m]	Le rayon
Q [3]	Le débit
p_v [Pa]	La pression de vapeur
p_1 [Pa]	La pression d'aspiration
p_2 [Pa]	La pression de refoulement
C [m/s]	La vitesse absolue
U [m/s]	La vitesse relative
W [m/s]	La vitesse de relative
E []	L'énergie totale de la pompe par unité de volume
b_1 [m]	La largeur de l'ailette à la point M_1
[m]	Hauteur manométrique
P_u [W]	La puissance utile
P_a [W]	La puissance absorbé
C_p	Coefficient de pression
E_u	L'énergie de la vitesse d'entraînement
E_w	L'énergie de la vitesse relative Nomenclature
g [2]	Accélération due à la pesanteur Alphabétique grec
ρ [3]:	La masse volumique
σ	Coefficient de cavitation
η_s [%]	Le rendement isentropique
η [%]	Le rendement mécanique
η_v [%]	Le rendement volumétrique
η_g [%]	Le rendement globale

Sigles

NPSH	Net Positive Suction Head (Charge nette absolue à l'aspiration)
$NPSH_{req}$	NPSH requise
$NPSH_{dis}$	NPSH disponible
HMT	Hauteur manométrique totale d'une pompe

Introduction générale

Introduction générale

L'homme a distribution de l'eau dans ses propres moyens primitifs, mais il ne pouvait pas le faire à des moments où la nappe phréatique est faible, apprendre à travers des expériences qui soulèvent l'eau du niveau bas au haut niveau nécessaire pour faire un effort manuel ou à l'aide de la machine ont besoin de travailler à l'alimentation animale ou de carburant. L'homme a essayé au fil des siècles pour profiter de l'eau de diverses manières dans divers domaines, y compris l'escadron, y compris l'irrigation et dans toutes les industries, et parce que le besoin humain de l'eau nécessite d'être transféré d'un endroit à un autre ou soulevé de faible niveau à haut niveau, il a inventé les moyens pour élever l'eau à partir de laquelle elle opère manuellement ou à l'aide d'un animal ou automatiquement. Comme l'augmentation des besoins humains pour les grandes quantités d'eau dans l'agriculture atteint une invention de la machine à roue hydraulique qui utilise la gestion de l'énergie animale. Avec l'invention de la machine à vapeur en 1769 et les gens de la révolution industrielle ultérieure déplacée de la campagne à la ville, il est apparu nécessaire de fournir une meilleure eau, permet à l'homme son intelligence aux premiers scooters de pompe alimenté en Angleterre en 1800 et utilisé pour soulever et déplacer des liquides d'un endroit à l'autre invention.

- Pompe: est une machine tourne l'élément de rotor dans le boîtier étanche retirer le liquide à l'intérieur pour le rendre occupé le poste par son énergie sous forme d'énergie a provoqué une augmentation de la pression et de faire sortir décollant de la sortie de la pompe.

Avec le progrès et le développement des zones industrielles de l'homme a besoin de se développer en d'autres types de pompes selon les domaines d'utilisation.

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-pompe

Pour décrire notre travail, nous empruntons le plan suivant :

- Le premier chapitre comporte des généralités sur les pompes.
- Le deuxième chapitre consacré aux méthodes de réglage utilisées pour régler les paramètres d'une pompe centrifuge.
- Le troisième chapitre présente la modélisation et commande de l'installation moteur-pompe.
- Le quatrième et le dernier chapitre comporte deux parties : l'une pour les calculs et la deuxième simulation à l'aide de logiciel MATLAB/Simulink.

Chapitre I

Généralités sur les pompes

I.1-Introduction:

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.1.1. Classification des pompes centrifuges :

On peut les classer de plusieurs manières, entraînant compte notamment :

❖ Du nombre de roue :

On distingue des machines monocellulaires et des machines multicellulaires. Une turbomachine monocellulaire, comporte une seule cellule c'est à dire une seule roue dont certaines roues ont des aubages fixes comme mobile (cas d'une roue ouverte). Dans certains cas ; Il est nécessaire de disposer plusieurs cellules actives placées en série, les fluides parcourant successivement chacune d'elle, d'où l'appellation des machines multicellulaires.

❖ De la forme des aubes de la roue :

- **Pompes centrifuges radiales:** pour lesquelles les filets de courant d'eau sont contenus dans des plans perpendiculaires à l'axe de la pompe.
- **Pompes axiale :** pour les quelle les filets de courant sont axiaux.
- **Pompes semi axiales :** (hélico-centrifuges) : Dont les filets sont situés sur des surfaces dont la méridienne est inclinée par rapport à l'axe de la pompe. C'est à dire semi- hélicoïdale (ni axiale, ni radiale).

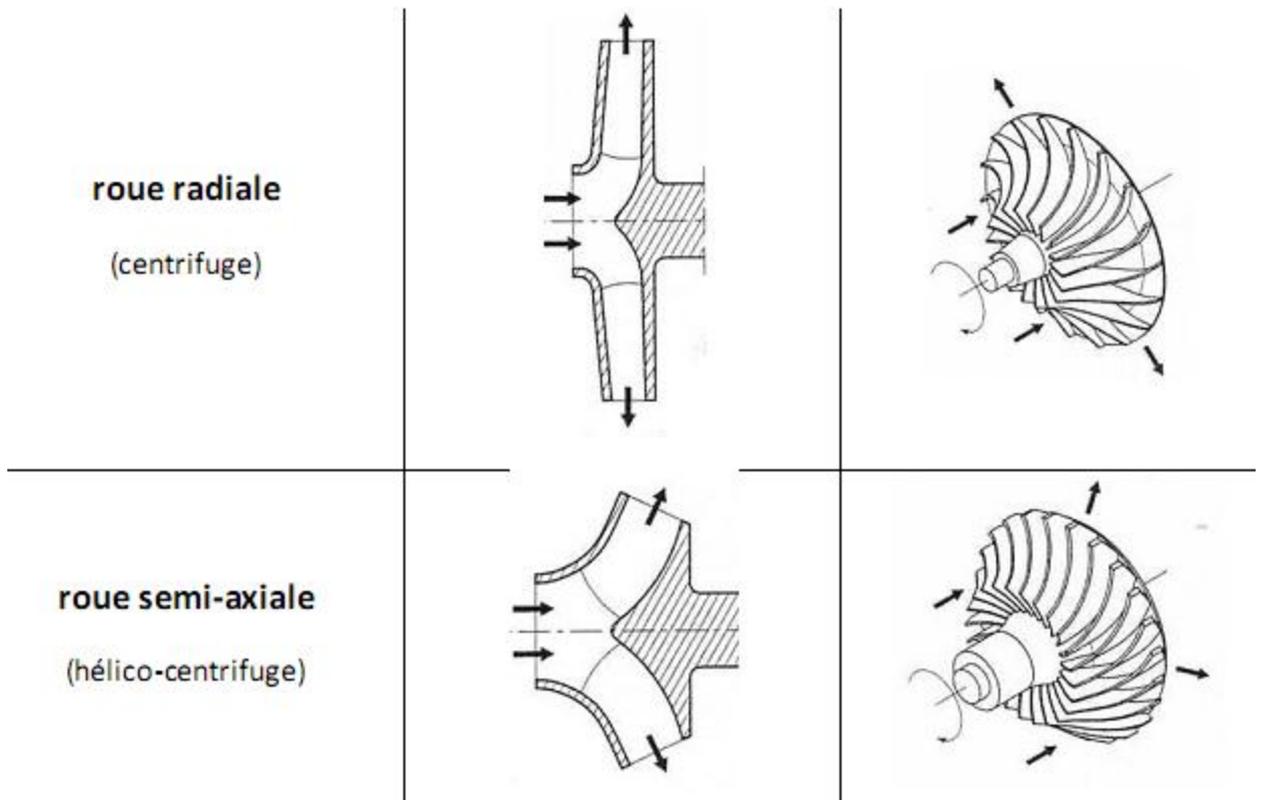


Figure I.1: Classification selon la forme de la roue

❖ De la direction de l'axe :

On peut avoir plusieurs dispositions :

- **Pompes à axe horizontal** : conçues pour être disposées en surface, l'entretien et le démontage de ces pompes sont alors simplifiés.
- **Pompes à axe vertical** : ce sont des pompes immergées spécialement conçues pour l'équipement des puits profonds. Elles peuvent être commandées par un moteur placé en surface ou par un moteur immergé.

❖ De la position de la pompe par rapport au niveau d'aspiration :

Selon la position de l'axe de la pompe par rapport au plan d'aspiration, on distingue :

- Des installations des pompes à dépression (en aspiration).
- Des installations des pompes en charge.
- Des installations des pompes type siphon.

I.1.2- Description et fonctionnement:

Les principaux éléments constituant la pompe centrifuge sont (Fig. I.15) :

- Le distributeur (tube d'aspiration)
- La roue (R) garnie d'aubes

- Le diffuseur garni ou non d'aubes fixes
- La volute (V) comportant l'ouïe d'aspiration

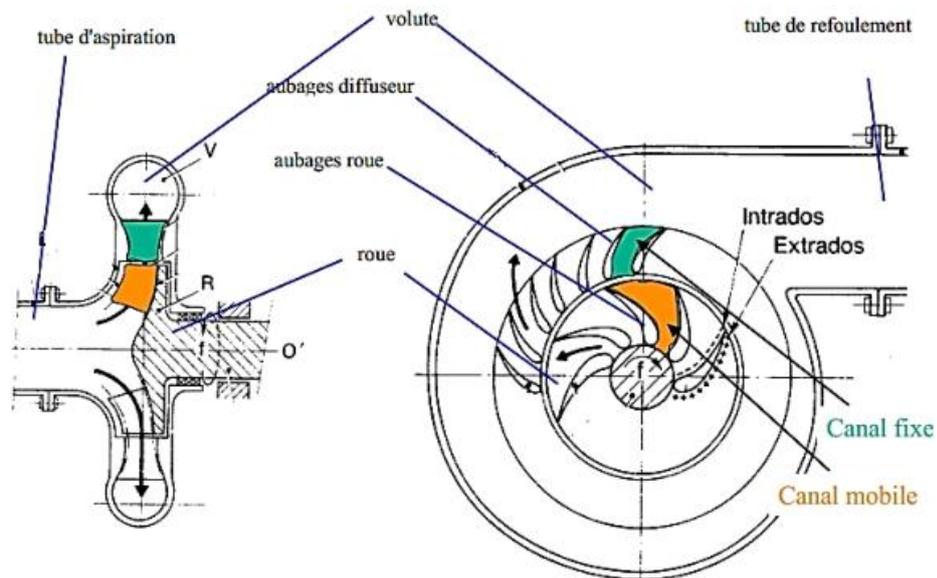


Figure. I.2 Principaux éléments d'une pompe centrifuge

la pompe centrifuge se compose de deux tuyauteries cylindriques : la conduite d'aspiration, qui sert à amener le fluide à l'entrée de la pompe et s'y trouve fixée par la bride, et la conduite de refoulement, fixée à la pompe par la bride. La partie active de la machine est constituée par la roue ou rotor R qui porte les aubages mobiles M appelés encore aubes, pales ou ailettes, et tourne à vitesse constante autour d'un axe. Ces aubages sont tous identiques en forme et, se déduisent l'un de l'autre par une rotation autour de le même 'axe qui désignant le nombre total de pales ; l'espace compris entre deux aubages mobiles constitue un canal mobile. A partir de la bride d'aspiration, le fluide se répartit régulièrement vers la section d'entrée des canaux mobiles que l'on appelle l'ouïe d'aspiration de la pompe.

Du fait du mouvement d'entraînement à vitesse angulaire constante imprimée par le rotor .

Les pales 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 travail de ces efforts demande un apport permanent d'énergie mécanique par l'arbre de la pompe. Ici réside donc le principe essentiel de fonctionnement d'une turbomachine génératrice, puisque cette énergie se trouve communiquée au fluide. A l'intérieur d'un canal mobile l'écoulement est permanent par rapport à un repère mobile solidaire du rotor. Dans le cas

considéré, la machine est qualifiée de centrifuge parce que, à la traversée du rotor, le fluide s'écarte de l'axe de rotation, chaque particule s'écoulant sensiblement dans un plan perpendiculaire à cet axe. Le stator de la pompe, encore appelé corps ou enveloppe, porte une couronne d'aubages fixes. Cette couronne présente donc de manière analogue à celle des aubages mobiles de symétrie par rapport à l'axe de rotation. L'espace compris entre deux aubages constitue un canal fixe. Les différents canaux fixes sont alimentés de manière identique par le rotor et se trouvent parcourus par un écoulement permanent par rapport à un repère absolu fixe. L'énergie reçue par le fluide pendant la traversée des canaux mobiles se manifeste par une augmentation, d'une part de sa pression et, d'autre part, de son énergie cinétique. En ralentissant le fluide la couronne d'aubages fixes, qui porte également le nom de diffuseur, provoque une nouvelle augmentation de pression. Le diffuseur assure donc au sein du fluide une conversion de l'énergie cinétique en énergie piézométrique.

À la sortie du diffuseur, le fluide doit être collecté et conduit vers la tuyauterie de refoulement. Cette dernière fonction est remplie par une capacité 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 à une transformation complémentaire de l'énergie cinétique en énergie piézométrique.

I.2.1. Paramètres d'une pompe centrifuge:

Les principaux paramètres qui caractérisent une pompe sont :

- La hauteur manométrique H_m
- Le débit volumique Q_v

Le tracé de la hauteur manométrique H en fonction du débit détermine la courbe caractéristique de la pompe.

I.2.1.1. Le débit :

Le débit est la quantité de matière (exprimé par une masse ou un volume) qui passe à chaque unité de temps à travers cette section. Si on choisit d'exprimer la quantité de matière, alors on parlera de débit massique. Si on choisit un volume on parlera de débit volumique. On notera q_m le débit massique et q_v le débit volumique.

1- Débit volumique Q_v

Le débit volumique « Q_v » caractérise la quantité de liquide qui passe à travers une section donnée (section de refoulement) « S » par unité de temps « t ». Cette quantité de liquide est aussi caractérisée par la vitesse de passage à travers cette section

$$. Q_v = V.S$$

2- Débit Massique

On obtient la relation entre le débit massique et le débit volumique : $Q_m = Q_v \cdot \rho$

I.2.1.2. Hauteur manométrique H_m

On appelle hauteur manométrique H d'une pompe, l'énergie fournie par la pompe à l'unité de poids du liquide qui la traverse. Si HTA est la charge totale du liquide à l'aspiration et HTR la charge totale du fluide à l'orifice du refoulement, la Hauteur manométrique de la pompe est :

$$H_m = HTA - HTR$$

La hauteur varie avec le débit et est représentée par la courbe caractéristique (Figure I .22)

$$H = f(Q_v)$$

Cette différence de pression entre la pression amont et la pression en aval en fonction du débit constitue la caractéristique de la pompe. La hauteur manométrique est généralement exprimée en hauteur de colonne d'eau (mètre de colonne d'eau : mCE). Pour déterminer la hauteur manométrique il faudra bien faire attention de considérer les pressions totale P_A (avant la pompe) et P_R (après la pompe). H_m est calculé à partir de la formule suivante :

$$H_m = (P_R - P_A) / \rho g$$

I.2.2. caractéristiques d'une pompe:

I.2.2.1. Puissance P :

La puissance disponible au niveau de l'arbre d'entraînement de la roue de la pompe est la puissance absorbée P_a de cette pompe. La puissance transmise au fluide est appelée puissance hydraulique utile P_u . Le rapport de la puissance utile P_u et la puissance absorbée P_a est le rendement global de la pompe. Si Q_v est le débit volumique du liquide, ρ sa masse volumique, et H la hauteur manométrique de la pompe, la puissance P et le rendement η sont donnée par :

$$P = Q_v \cdot \rho g H \quad (\text{II.16})$$

I.2.2.2. pertes:

a. Pertes mécaniques:

- Pert 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 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 hydraulique 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.

I.2.2.3 Rendement:

Le rendement η d'une pompe est le rapport de la puissance totale utile P (puissance hydraulique) communiquée au liquide pompé à la puissance P_a absorbée par la pompe (en bout d'arbre).

$$\eta = p_u / P_a \quad (\text{II.17})$$

On notera que : Le rendement de la pompe varie et passe par un maximum pour le débit maximal autour duquel la pompe doit être utilisée.

I.2.3. Courbe caractéristique et point de fonctionnement:

La courbe caractéristique d'une pompe détermine le développement de la hauteur en fonction du débit.

La courbe du réseau (également appelée caractéristique du circuit) représente l'énergie par unité de poids H ou encore l'énergie par unité de volume Δp à fournir au fluide pour le faire circuler avec un débit Q_v . Elle tient donc compte de l'élévation éventuelle du fluide, et des pertes de charge dans le circuit de refoulement, comme illustré sur la figure ci-dessous. L'intersection de la courbe du réseau et de la caractéristique de la pompe définit le point de fonctionnement et donc le débit nominal.

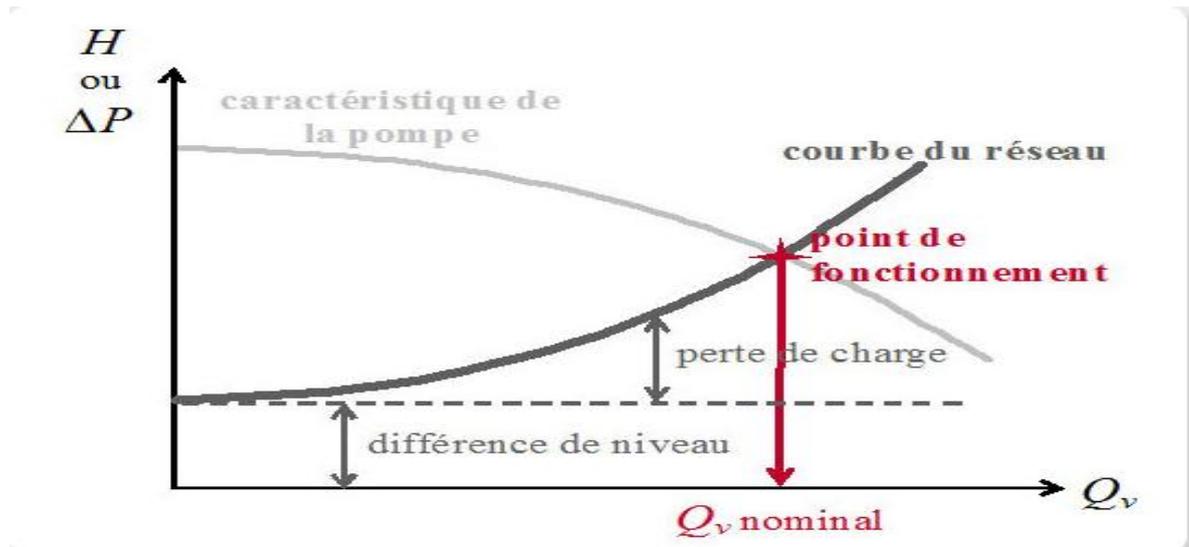


Figure I.3: courbe caractéristique d'une pompe centrifuge. [9]

I.3- Les facteurs de dysfonctionnement des pompes centrifuges:

Les ruptures du fonctionnement d'une pompe peut être causée par plusieurs facteurs à savoir:

- Surcharge

Une pompe est choisie d'après certaines conditions spécifiques telles que débits, pression, vitesse... qu'elle peut fonctionner de temps à autre en surcharge. Mais si on oublie que ce service devrait être rendu occasionnellement, et qu'on la fait tourner 24 heures par jour sous ce régime, on obtient une rupture de l'arbre ou des grillés.

- Mauvais graissage

Si on fait tourner une pompe avec des paliers sans graisse, on finit par un arrêt brutal ; dans ce cas, on s'aperçoit souvent de l'absence de graisseur sur la pompe ou sur la pompe concernée n'est pas inscrite dans le plan de graissage. Le fiabiliste doit veiller à la présence des graisseurs les cas échéant ou les retirer dans le cas du roulement graissé à vie.

- Fluide inadapté

Si on modifie le critère de pompage en changeant la nature du fluide à véhiculer ou en augmentant la température, les matériaux peuvent ne pas être adaptés ; la pompe risque d'être détruite.

- Fonctionnement à vide

En cas d'absence de contrôle de démarrage, la vanne de refoulement étant fermée, ainsi que la vanne de by-pass, la pompe peut fonctionner à vide ; le débit est nul, toute la puissance fournie se transforme en chaleur. Et puisque le liquide ne circule pas, la chaleur produite ne

peut être évacuée. Dans ce cas la roue et la garniture seront endommagées.

- Mauvais alignement

La pompe et le moteur ne sont pas exactement en face par le défaut de l'accouplement, défaut de fixation ou de fondation. Les paliers et l'arbre seront soumis à des vibrations et finiront par se casser.

- Fuite

Le liquide fuit. Si le liquide est acide, les pièces métalliques extérieures qui sont différentes de la partie hydraulique seront attaquées et rongées. Une fuite abondante provient de l'usure de la garniture ou d'un défaut de tresse.

- Corps étranger

Des particules solides peuvent s'introduire dans le liquide s'il n'y a pas de crépine d'aspiration ou de protection à l'entrée. Elles peuvent détruire les pièces hydrauliques.

- Contraintes des tuyauteries

Si les brides des tuyauteries d'aspiration et de refoulement ne sont pas en face de celles de la pompe et si le montage se fait en forçant sur les tuyauteries, une traction anormale s'exerce sur la pompe. Cette traction peut causer des déformations externe et interne de la pompe et un frottement de la roue sur le corps de la pompe ou la brisure des tubulures d'aspiration et de refoulement.

I.3.1 Cavitation :

On appelle cavitation d'une pompe centrifuge la vaporisation, à l'entrée de la roue, d'une partie du liquide pompé. C'est en effet en ce point que la pression est en général la plus basse. On considère en général que cette vaporisation est liée au fait que la pression statique tombe en dessous de la pression de vapeur saturante du fluide pompé. En réalité, il s'agit parfois de la création de bulles de gaz dissous dans le liquide (cas de l'eau notamment), on parle alors de cavitation apparente.

Les effets de la cavitation peuvent être très néfastes pour la pompe :

- la création de bulle de vapeur à l'aspiration s'accompagnant de leur condensation brutale dans ou en sortie de roue, lorsque la pression remonte,
- implosion des bulles de vapeur au niveau de la roue,
- vibrations anormales,
- bruit anormal (pompage de caillou?) ,
- destruction des garnitures d'étanchéité suite aux vibrations,
- arrachement de matière dans les zones d'implosion,

- chute du débit pompé lorsque apparaît le phénomène de cavitation.

La cavitation peut être prévue par le calcul du NPSH disponible à l'aspiration de la pompe, et sa comparaison avec le NPSH requis par la pompe. La cavitation apparaît pour $NPSH_{dispo} = NPSH_{requis}$

I.3.2 NPSH -Hauteur nette absolue à l'aspiration:

Plusieurs paramètres doivent être vérifiés pour assurer une bonne performance des pompes centrifuges.

L'un de ces paramètres est la hauteur nette absolue à l'aspiration (NPSH) du liquide à l'impulseurs.

Deux valeurs de NPSH doivent être considérées : la hauteur nette à l'aspiration requise ($NPSH_{req}$) et la hauteur nette à l'aspiration disponible ($NPSH_{disp}$).

Le $NPSH_{req}$ est déterminé par le fabricant de la pompe. Cette valeur dépend de plusieurs facteurs comme la géométrie de l'impulseur, le débit de la pompe, la vitesse de rotation, la nature du liquide, etc.

On définit ensuite le $NPSH_{disp}$ selon l'équation suivante :

$$NPSH_{disp} = h_a - h_{vap} \pm h_{st} - h_{fs}$$

h_a : pression absolue à la surface du liquide au point d'alimentation

I.3.3 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 "susceptibles" c'est-à-dire ne supportant pas la très forte agitation dans la pompe (liquides alimentaires tel que le lait).
- ✓ Utilisation de liquides visqueux, la pompe centrifuge nécessaire serait énorme par rapport aux débits possibles.
- ✓ 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.3.4. Avantages et inconvénients des pompes centrifuges:

- Avantages :

- Faible encombrement.
- Simplicité de construction.
- Bruite négligeable.
- Régularité dans le fonctionnement
- Absence variation de débit et de pression.
- Aptitude du fonctionnement à grande vitesse, donc l'accouplement peut se faire directement avec des moteurs diesel ou l'installation avec des multiplicateurs des vitesses.

-Inconvénients :

- A faible débit où à grande hauteur de refoulement, le rendement diminue.
- Phénomène de cavitation en cas de pression insuffisante à l'aspiration.
- Diminution de la hauteur de refoulement en cas de mauvaise étanchéité de la conduite d'aspiration.

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.

Chapitre II

Méthodes de réglage des paramètres d'une pompe centrifuge

II.1-Introduction:

La pompe fonctionne habituellement selon une gamme de débits variables et parfois même selon une gamme de hauteurs statiques variables. Le développement de la hauteur en fonction du débit décrit la courbe caractéristique de la pompe. Pour satisfaire toutes les conditions de fonctionnement, on doit faire correspondre la courbe du système avec la courbe d'une pompe. Les points correspondant à chaque fonctionnement particulier définissent un champ de fonctionnement sur la courbe de la pompe. La variation de l'un des deux paramètres essentiels la pompe conduit automatiquement la variation de l'autre paramètre, et en conséquence affecte le régime de fonctionnement. Pour garder le bon fonctionnement de la pompe on prendra soin de conserver le rapport de relation entre la hauteur et le débit. Pour atteindre ce but on procède au réglage des paramètres de la pompe au besoin de fonctionnement.

II.2-Méthodes de réglage du débit d'une pompe centrifuge

Dans le domaine industriel il est en effet de nombreuses méthodes pour changer les caractéristiques d'une pompe par la variation du débit.

II.2.1- Régulation du débit par laminage:

La modification du débit, Q , par réglage d'un organe de laminage est la méthode la plus simple tant pour un réglage unique que pour une régulation en continu car elle requiert le minimum d'investissement. Elle est toute fois la moins favorable du point de vue consommation d'énergie car elle transforme irréversiblement l'énergie hydraulique en énergie thermique.

La figure II.1 illustre ce processus : par l'augmentation ciblée des résistances de l'installation (p. ex. par étranglement d'une robinetterie du côté refoulement de la pompe), la courbe caractéristique de réseau, HA1, ainsi modifiée, se déplace vers la courbe, HA2, de pente plus élevée. À vitesse de rotation de la pompe constante, le point de fonctionnement, B1, se déplace sur la courbe débit-hauteur de la pompe en B2, vers un plus petit débit. La pompe génère une plus grande hauteur manométrique que ce qu'il serait nécessaire pour l'installation ; ce surplus de hauteur manométrique est dissipé dans l'organe de laminage, l'énergie hydraulique étant irréversiblement transformée en énergie thermique et évacuée avec le fluide. Cette perte est encore acceptable si la plage de régulation est faible et si la régulation n'est que rarement nécessaire. L'économie de puissance obtenue est représentée dans la partie inférieure de la figure et est comparé au surplus de hauteur manométrique relativement modérée.

Le même phénomène s'applique en principe également lorsqu'un diaphragme à arête vive est

monté sur la conduite de refoulement. Cette méthode est encore justifiée dans le cas de faibles puissances ou de courtes durées de fonctionnement. Le diamètre de l'ouverture nécessaire, d_{Bl} , de l'organe de laminage est calculé à partir de la différence de hauteur manométrique, ΔH , d'après l'équation.

$$d_{Bl} = f \cdot \sqrt{Q/\sqrt{g \cdot \Delta H}}$$

Avec :

d_{Bl} : diamètre d'ouverture de la plaque perforée, en mm,

f : coefficient de laminage .

Q : débit, en m³/h,

g : accélération de la pesanteur 9,81 m/s²

ΔH : différence de hauteur manométrique, H, à laminier, en m.

Étant donné qu'une première estimation du rapport d'ouverture $(d_{Bl}/d)^2$ est nécessaire, le calcul est fait par itération (une représentation graphique du diamètre calculé en fonction du diamètre estimé, d_{Bl} , de l'ouver-

ture peut être utile pour interpoler facilement le résultat après deux itérations.

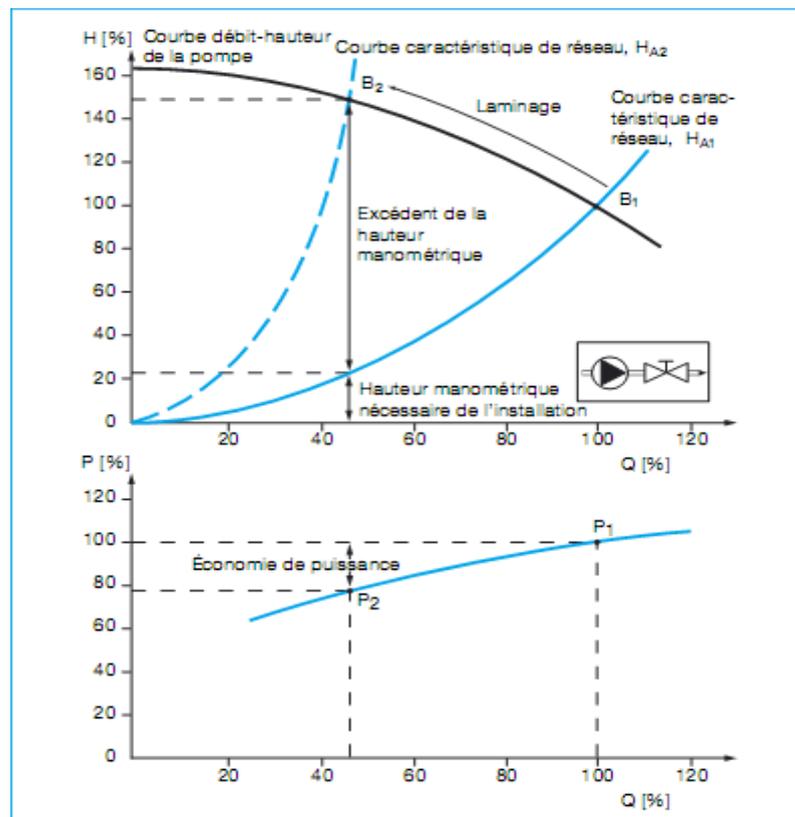
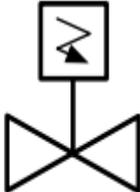
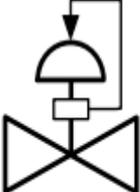


Figure II.1 : Évolution du point de fonctionnement et économie de Puissance dans le cas d'un étranglement de pompes avec une courbe Caractéristique de puissance croissante

II.2.2-Réglage du débit par vanne de réglage:

II.2.2.1- Schématisation des vannes:

La vanne de régulation est utilisée comme organe de réglage dans différents types de boucles de régulation. Elle permet de contrôler le débit dans une canalisation, en modifiant les pertes de charges de celle-ci. Il existe plusieurs représentations d'une vanne :

Vanne simple	Vanne manuelle	Vanne Pneumatique	Electrovanne	Vanne pneumatique avec positionneur
				

II.2.2.2 -Situation:

La vanne de régulation est utilisée comme organe de réglage dans différentes boucles de régulation [12].

II.2.2.2.1 - Réglage de débit:

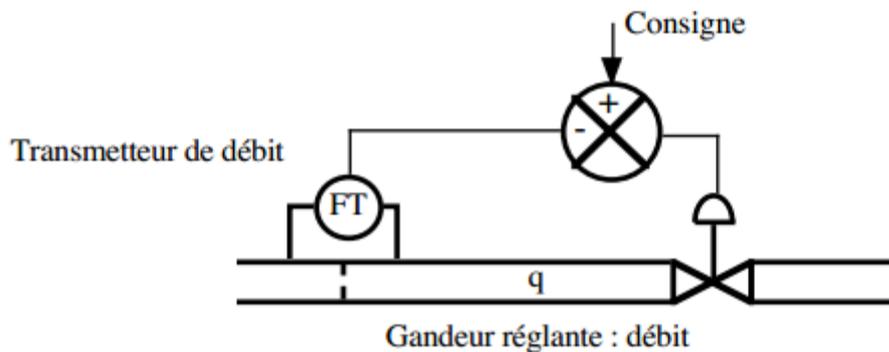


Figure II.2 – Régulation de débit

C'est la fonction principale de la vanne de régulation. La commande de la vanne contrôle le débit du fluide qui la traverse.

II.2.2.2.2- Réglage de niveau:

Le niveau dans le réservoir varie en fonction du débit d'alimentation et du débit d'utilisation. La grandeur réglée est le niveau, il doit suivre la consigne du régulateur. La vanne de réglage est l'élément de la chaîne de régulation permettant de faire varier le débit d'alimentation en fonction de la consigne.

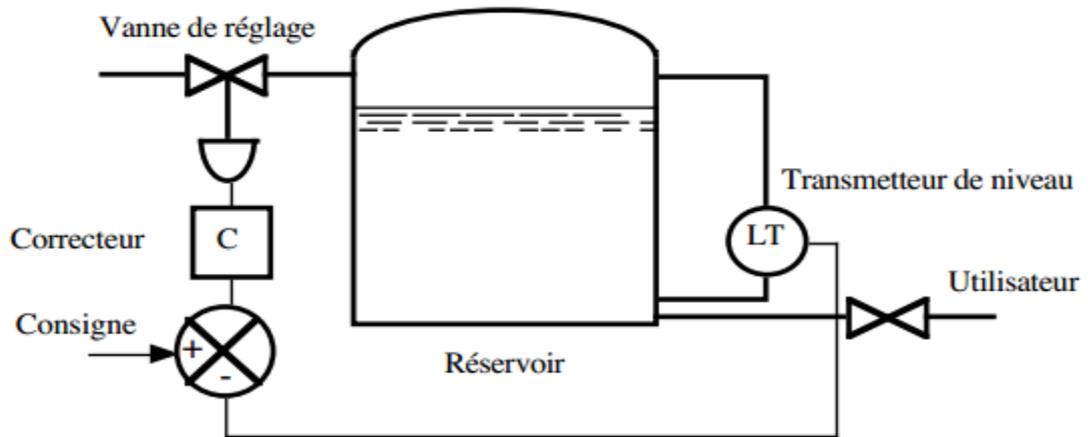


Figure II.3 – Régulation de niveau

II.2.2.2 .3- Réglage de pression:

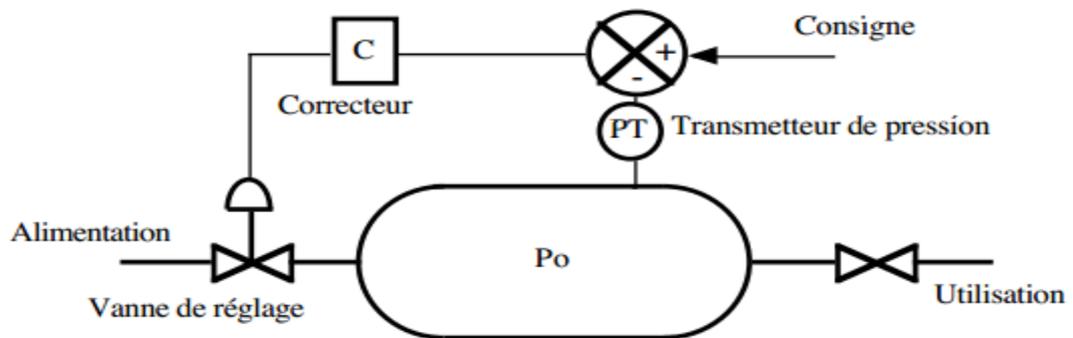


Figure II.4 – Régulation de pression

La cuve est sous pression P_o (air comprimé par exemple). P_o est la grandeur à régler. La grandeur réglant est le débit d'alimentation. Les perturbations proviennent de l'utilisation.

II.3- Réglage du débit par variation de la vitesse de rotation:

La variation de vitesse de peut être un moyen d'adapter le fonctionnement de la pompe au besoin du procédé en opération.

Le plus souvent on agira sur:

- la vitesse de rotation du moteur électrique (à courant continu, synchrone ou asynchrone) au moyen d'un variateur électronique
- la vitesse de rotation d'une turbine en agissant sur le débit de fluide moteur
- la vitesse d'un moteur thermique

• Lois de similitude

Les courbes caractéristiques d'une même pompe varient avec les vitesses de rotation, selon la loi de similitude (loi d'affinité). Si les courbes caractéristiques, H et P , en fonction de Q sont connues à la vitesse, n_1 , tous les points des courbes caractéristiques à la vitesse, n_2 , peuvent

être calculés à partir des équations suivantes :

$$Q_2 = Q_1 \cdot n_2/n_1 \quad (21)$$

$$H_2 = H_1 \cdot (n_2/n_1)^2 \quad (22)$$

$$P_2 = P_1 \cdot (n_2/n_1)^3 \quad (23)$$

Coefficient de débit :
$$\delta = \frac{Q}{ur^2}$$

Coefficient manométrique :
$$\mu = \frac{gH_t}{u^2}$$

Coefficient de puissance :
$$\tau = \frac{gP_A}{\rho u^3 r^2}$$

Coefficient de rendement :
$$\eta = \frac{P_u}{P_A}$$

avec : Q débit d'air en m^3/s

u vitesse linéaire en m/s

r rayon de la roue en m

H_t pression totale en Pa

P_A Puissance Absorbée en W

g accélération de la pesanteur en m/s^2

ρ masse volumique du fluide en kg/m^3

L'équation (23) ne s'applique que dans la mesure où le rendement, η , ne diminue pas si la vitesse de rotation, n , diminue. Le point de fonctionnement se déplace également sur la courbe lorsque la vitesse de rotation varie. La figure II.5 montre les courbes débit-hauteur à plusieurs vitesses de rotation. Ces courbes ont chacune un point d'intersection avec la courbe caractéristique de réseau, HA1. Le point de fonctionnement se déplace sur cette courbe caractéristique de réseau vers les plus petits débits lorsque la vitesse de rotation diminue.

Dans la mesure où la courbe caractéristique de réseau, HA1, est une parabole à l'origine, comme montré dans l'exemple, et lorsque la vitesse est divisée par deux, la hauteur manométrique, H , est divisée par 4 d'après l'équation 22 et la puissance absorbée, P , divisée par 8 par rapport à la valeur initiale d'après l'équation 23. La partie inférieure de la figure II.5 montre l'économie, $\Delta P1$, réalisée par rapport à celle obtenue par laminage.

Si la courbe caractéristique de réseau, HA2, de l'exemple est par contre une parabole avec une grande partie statique, HA2 stat, il faut prendre en compte que le point d'intersection avec la

courbe débit-hauteur de la pompe peut éventuellement disparaître aux vitesses de rotation réduites ; il n'y a donc plus de point de fonctionnement ; les plages inférieures de la vitesse de rotation sont donc sans objet et peuvent être épargnées. Les économies possibles de puissance, ΔP_2 , sont dans ce cas, pour un même débit, Q , inférieures à celles obtenues dans le cas de la courbe caractéristique de réseau, HA_1 , comme le montre la partie inférieure du graphique [10]. Le gain de puissance par rapport au laminage est ainsi d'autant plus petit que la partie statique, HA_{stat} , est importante (c'est à dire que la partie dynamique, HA_{dyn} , est petite)[13].

La variation de vitesse signifie en général variation de fréquence, ce point doit être pris en considération lors du choix des moteurs d'entraînement. La charge financière entraînée n'est pas négligeable, mais est vite amortie si les pompes sont souvent en fonctionnement et fonctionnent en charge partielle, pour une faible HA_{stat} [12]. Ceci s'applique en particulier aux pompes des installations de chauffage.

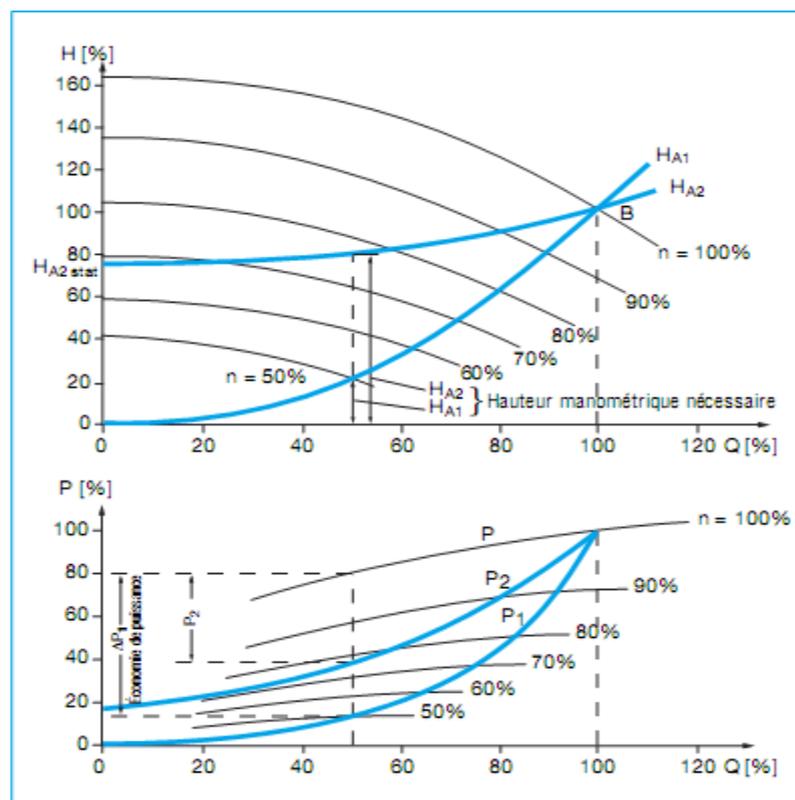


Figure II.5 : Fonctionnement d'une pompe à vitesse de rotation variable pour différentes courbes caractéristiques de réseau, HA_1 et HA_2 . (Économie de puissance, ΔP_1 et ΔP_2 pour demi-charge, comparaison avec l'économie obtenue par laminage)

Parmi les différents modes de réglage de débit, la variation des vitesses est la plus performante. Elle permet de contrôler adéquatement le débit et d'économiser l'énergie.

- **Lois NPSH:** On définit l'équation suivante:

$$\text{NPSH disp} = h_a - h_{\text{vap}} \pm h_{\text{st}} - h_{\text{fs}}$$

h_a : pression absolue à la surface du liquide au point d'alimentation de la pompe (p_i de liquide)

h_{vap} : pression de vapeur absolue du liquide à la température de pompage (p_i)

h_{st} : différence de hauteur du liquide à l'alimentation par rapport au centre de la pompe

h_{fs} : pertes de charge par frottement dans le tuyau d'aspiration (p_i)

Ces différentes données permettent de calculer la valeur NPSHdisp. suivant la formule suivante:

Cas de fonctionnement en charge:

II.3.1-Variation de vitesse des moteurs asynchrones:

La variation de la vitesse des moteurs asynchrone est la méthode la plus utilisée pour régler le débit d'une pompe centrifuge, grâce à sa construction simple et sa robustesse. Au cours de cette partie nous présentons les différentes méthodes de variation de vitesse de ce type de moteur.

II.3.1.1-Principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone:

Le stator, alimenté par un réseau de fréquence f , crée une induction tournante B_s de vitesse N_s telle que $N_s = \frac{f}{p}$. Supposons le rotor immobile : il est balayé par cette induction et des forces électromotrices sont engendrées dans les conducteurs (loi de Faraday $e = \frac{d\phi}{dt}$).

Comme les circuits rotoriques sont fermés, des courants rotoriques prennent naissance. Il apparaît des forces électromotrices dues à l'action de l'induction statorique sur les courants rotoriques. En vertu de la loi de Lenz, ces forces tendent à entraîner le rotor dans le sens des inductions tournantes. Il existe un couple de démarrage, le rotor se met à tourner si le couple est suffisant.

Pour qu'il y ait couple, il faut donc :

– que les circuits rotoriques soient fermés, sinon les courants rotoriques



Figure II.6 – les trois bagues de l'arbre moteur d'une machine asynchrone à rotor bobiné.

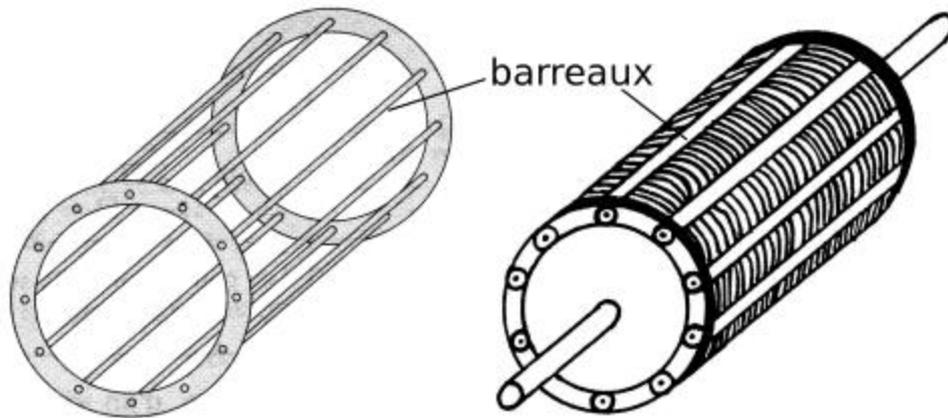


Figure II.7 – rotor à cage d'écureuil, la cage vide de fer à gauche et remplie de rondelles de fer à droite.

Sont nuls :

– que la vitesse N prise par le rotor soit différente de la vitesse N_S de l'induction. Si $N = N_S$, les conducteurs tournent à la vitesse de l'induction statorique, aucune f.é.m. n'est induite, et par conséquent aucun courant ne circule dans le rotor : il ne peut y avoir de couple.

On obtient donc un résultat très différent de celui de la machine synchrone pour laquelle il n'y avait de couple qu'au synchronisme. Pour la machine synchrone : si $N < N_S$ couple moteur .

II.3.1.2- STRUCTURE - PRINCIPES DE FONCTIONNEMENT:

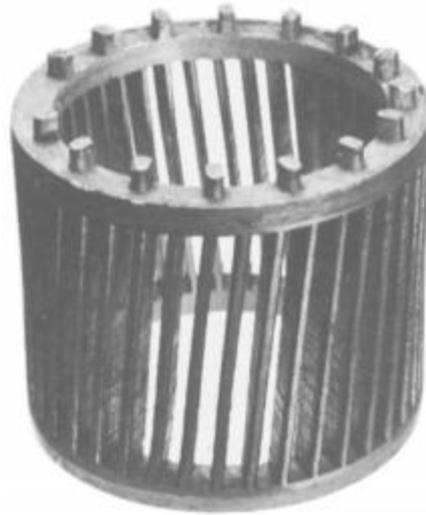


Figure II.8 : rotor à cage d'écureuil, le rotor est en aluminium injecté et moulé sous pression sur les rondelles de fer ; celles-ci ont été éliminées avec de l'acide afin de rendre la cage d'écureuil parfaitement visible.



Figure II.9: L'aspect extérieur d'un rotor à cage ne permet pas de distinguer la cage d'écureuil pourtant bien présente à l'intérieur.

- si $N = NS$ couple nul .
- si $N > NS$ couple de freinage.

REMARQUE :

- Le nombre de pôles doit être le même au rotor et au stator. Dans le cas de la cage d'écureuil, ce résultat est automatique. La répartition des f.é.m. dans les barreaux de la cage est imposée par les pôles de l'inducteur statorique actif : deux barreaux distants de $180^\circ/p$ ont des f.é.m. opposées et constituaient une « spire » dans laquelle circule le courant rotorique. Le nombre de pôles rotoriques est donc égal à p

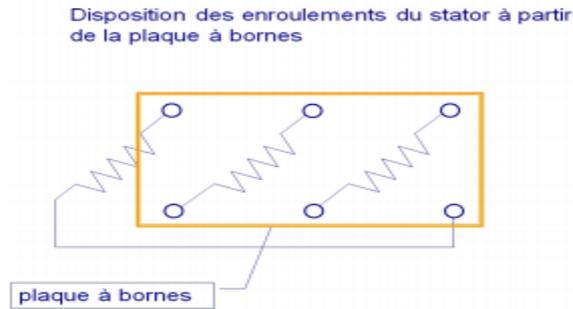


Figure II.10 : Plaque à bornes d'une machine asynchrone triphasée.

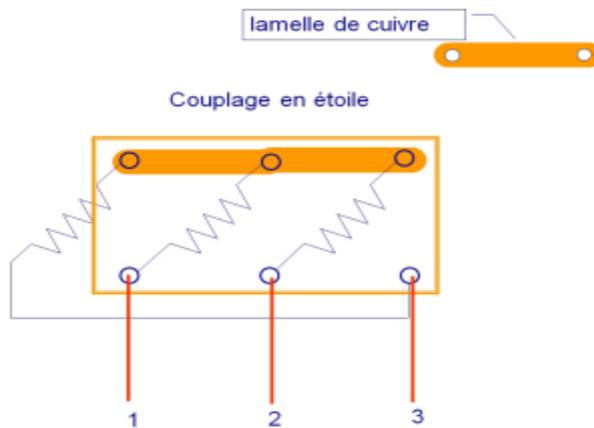


Figure II.11 : Couplage du stator en étoile d'une machine asynchrone triphasée.

– Démarrage en asynchrone d'un moteur synchrone : on place souvent une cage d'écurieil sur l'inducteur d'un moteur synchrone. Cette cage s'oppose aux déplacements relatifs du rotor par rapport à l'induction tournante du stator et par suite amortit le mouvement de décalage du rotor lors des phénomènes transitoires dus aux variations brusques de couple (amortisseur Leblanc). Comme pour le moteur asynchrone, le démarrage est alors possible en l'absence d'excitation continue. Si le moteur est à vide, il atteindra presque la vitesse de synchronisme et on pourra alors le synchroniser en l'excitant. Ce mode de démarrage, très simple, ne convient qu'aux moteurs

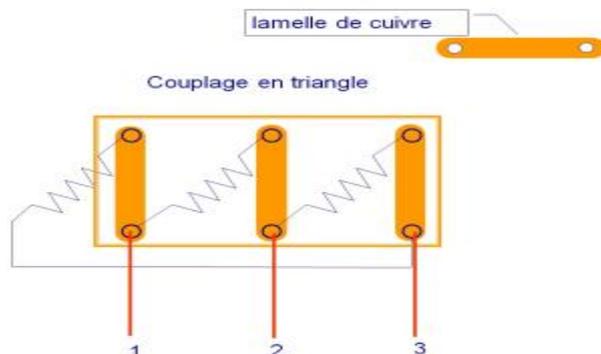


Figure II.12 : Couplage du stator en triangle d'une machine asynchrone triphasée.

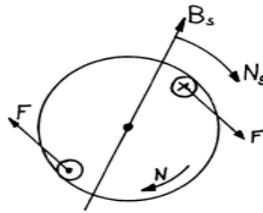


Figure II.13 :Principe de fonctionnement d'une machine asynchrone.

Synchrones de faible puissance en raison du courant et du couple élevés lors de la synchronisation.

II.3.1.2-Glisement:

L'origine des courants rotoriques réside dans la différence des vitesses NS et N. On introduit une grandeur fondamentale, sans dimension, le glissement g définie par :

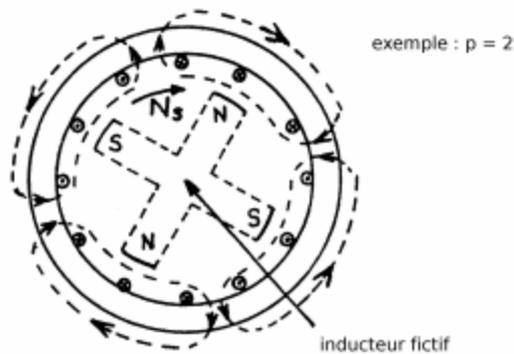


Figure II.14 – Une machine asynchrone comporte le même nombre de pôles au rotor et pour une phase statorique.

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{\Omega_s - \Omega}{\Omega_s}$$

Notons que :

- N = 0 g = 1 démarrage
- N = N_s g = 0 synchronisme
- 0 < N < N_s 0 < g < 1 moteur
- N > N_s g < 0 génératrice

II.3.1.3-Bilan de puissance:

On peut regrouper sur un diagramme les diverses pertes de puissance active du moteur :

- Puissance absorbée : Pa= 3V1 I₁ cos φ₁
- Pertes Joule du stator : si R1 est la résistance d'une phase statorique, alors PJS=3R1I₁²

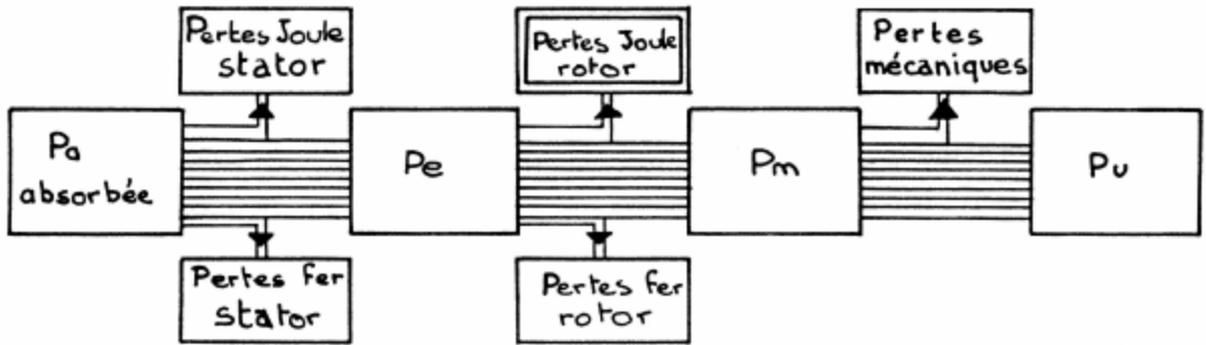


Figure II.15 : Diagramme de bilan de puissance d'une machine asynchrone.

- Pertes fer stator : comme pour le transformateur, elles seront liées au carré de la tension : P_f
 - Puissance électromagnétique P_e , c'est la puissance transmise du stator au rotor par les inductions tournantes à la vitesse N_s : $P_e = C_e 2\pi N_s$
 - Pertes Joule rotor : si R_2 est la résistance d'une phase rotorique et I_2 le courant rotorique, on aura : $P_{JR} = 3R_2 I_2^2$ Pour une cage, on définit une résistance et un courant équivalent en assimilant la cage à un enroulement polyphasé.
 - Pertes fer rotoriques : elles sont faibles en fonctionnement normal car la fréquence rotorique est petite. On les négligera en pratique devant les pertes joule dans les conducteurs du rotor.
 - La puissance mécanique est fournie par le rotor à la vitesse N : $P_m = C_m 2\pi N = C_m \Omega$
 - Les pertes mécaniques correspondent à un couple de frottement C_f
 - La puissance utile, délivrée sur l'arbre de sortie du moteur, s'écrit en introduisant le couple utile : $P_u = C_u 2\pi N = C_u \Omega$
- On a évidemment : $C_u = C_m - C_f$ L'équilibre dynamique du rotor implique l'égalité des couples C_e et C_m Il en résulte une propriété remarquable du moteur :

$$P_e = C_e 2\pi N_s = P_m + P_{JR} = C_e 2\pi N + P_{JR}$$

$$P_{JR} = C_e 2\pi (N_s - N) = C_e 2\pi g N_s = g P_e$$

$$P_{JR} = g P_e = g C_e \Omega_s$$

En négligeant les pertes fer rotor, on voit que les pertes Joule rotor sont directement liées à la production de puissance électromagnétique. Si C_e n'est pas nul, comme g est nécessairement différent de zéro, il faut qu'il y ait des pertes Joule rotor. Cette constatation, spécifique des machines asynchrones, implique une incidence directe sur le rendement. On a :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} = \frac{P_u}{P_m} \times \frac{P_m}{P_e} \times \frac{P_e}{P_a} < \frac{P_m}{P_e}$$

Or : $\frac{P_m}{P_e} = \frac{N}{N_s} = 1 - g$

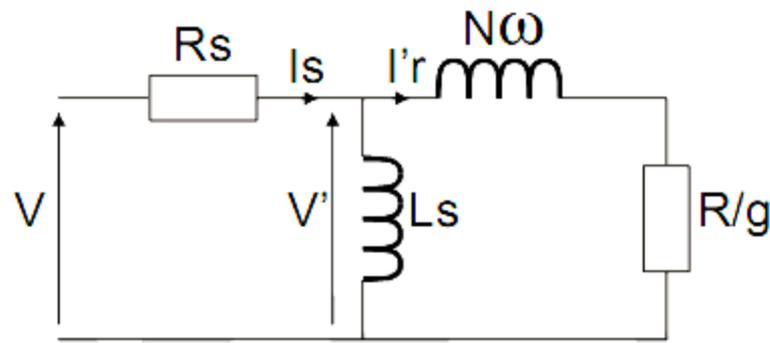
Donc : $\eta < \frac{N}{N_s}$

Le rendement est directement lié à la vitesse de rotation. Ainsi, par exemple :

– si $N = N_s/2$, le rendement sera inférieur à 0,5 .

– si $N = 0,9 \cdot N_s$ le rendement sera inférieur à 0,9. Il faudra donc, en pratique, limiter le fonctionnement du moteur aux faibles glissements, sinon le rendement devient faible et l'échauffement du rotor important.

II.4-Schéma équivalent:



II.4.1-Vitesses du moteur asynchrone

vitesse de synchronisme:

$$n_s = \frac{f \text{ (Hz)}}{p \text{ nb de paire de pôles}} \quad \left[\begin{array}{l} \text{glissement} \\ n = \frac{f}{p} (1 - g) \end{array} \right]$$

$$g = \frac{n_s - n}{n_s} \rightarrow n = n_s (1 - g)$$

II.4.2-modes variation de vitesse d'un moteur asynchrone

La vitesse de rotation du moteur peut donc être modifiée comme suit:

- Action sur « p » action discontinue.
- Action sur « g »
 - \$ par baisse de la tension du stator.
 - \$ par augmentation de la résistance du rotor
 - \$ par addition d'un couple de freinage.

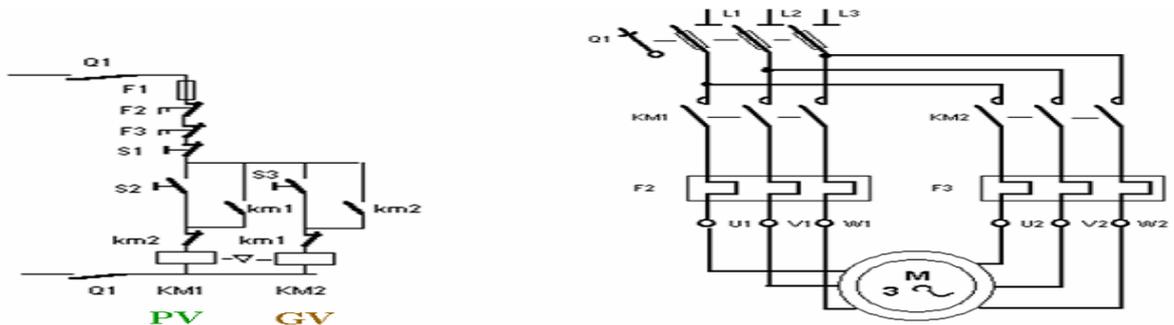
- Action sur « f » par hacheur-onduleur, Cycloconvertisseur.

ACTION SUR P (Moteur à deux vitesses):

- Moteur à enroulements séparés

Les deux enroulements sont indépendants, isolés, montés l'un après l'autre dans les encoches du même stator. Ils permettent un rapport de vitesse quelconque mais fixé à la fabrication, (un enroulement hors tension ne doit jamais être couplé en triangle “ courants induits”).

Les intensités nominales étant généralement différentes, deux relais thermiques de protection sont nécessaires.

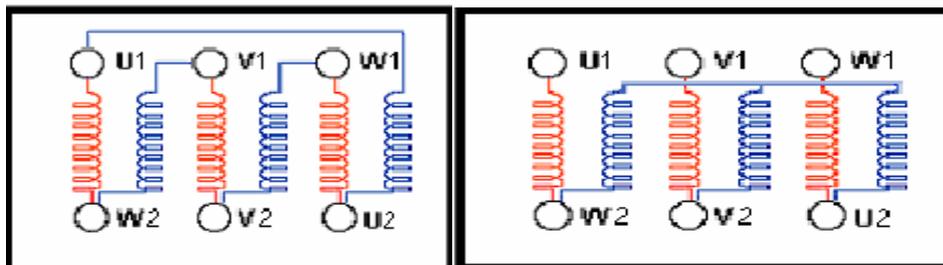


Moteur à couplage de pôles (Dahlander - Lundstrom)

Ces moteurs n'ont qu'un seul bobinage triphasé. Il ne permet qu'un seul rapport de vitesse de 1 à 2 Ce rapport est obtenu par couplage des enroulements.

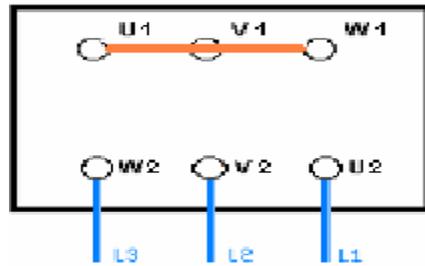
Deux couplages sont possibles:

(Δsérie -  parallèle) machines outils

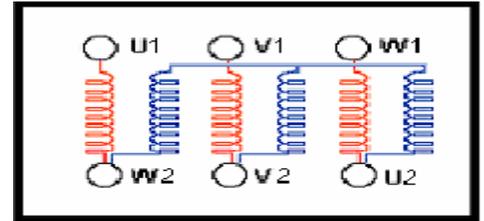


( série -  parallèle) machines centrifuges

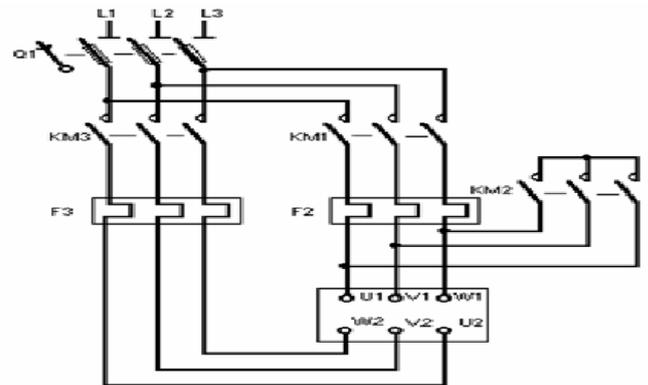
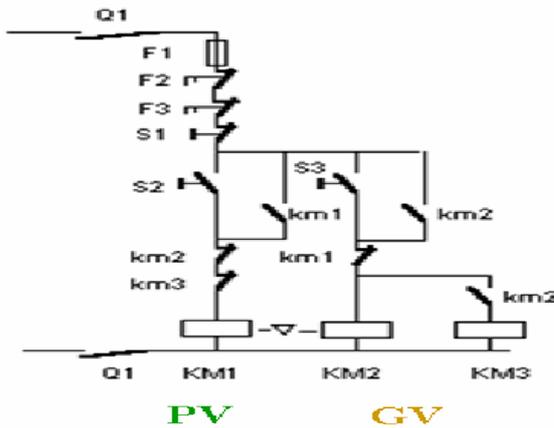
Les mêmes raccordements sont à réaliser au niveau de la plaque à bornes. Le choix d`couplage est à préciser à l'achat du moteur.



Grande vitesse



Petite vitesse



ACTION SUR g:

Pour un moteur asynchrone, en fonction de la vitesse, le couple varie comme le carré de la tension.

$$C = K U^2$$

Le couple passe par un maximum pour:

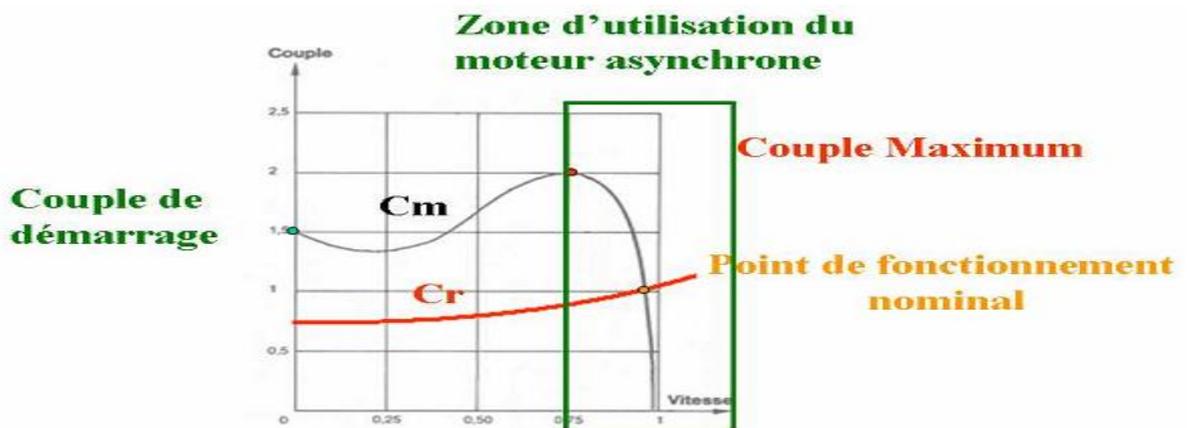
$$g \omega = R / L$$

R : résistance du rotor

L : inductance du rotor

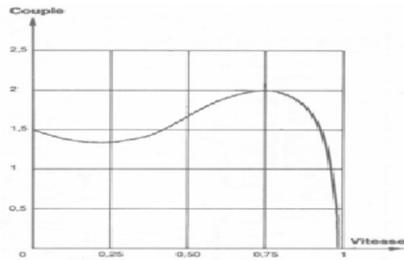
g : glissement

ω : vitesse angulaire de synchronisme

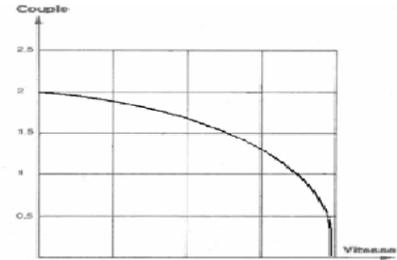


Au delà de la vitesse correspondant au couple maximal le fonctionnement du moteur est stable, en de ça le moteur décroche.

La caractéristique couple vitesse des moteurs asynchrones dépend de la fabrication du rotor.



Moteur à simple cage



Moteur à cage résistante

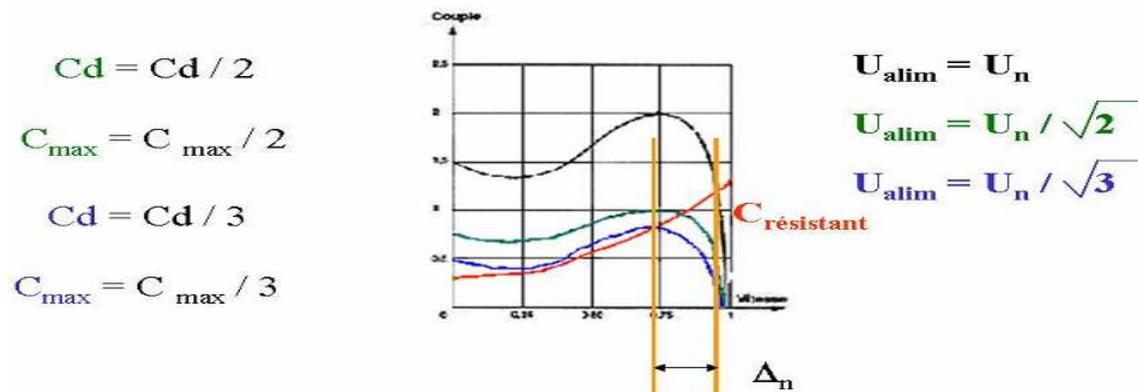
La plage de variation de vitesse permise dépend de l'allure de cette caractéristique.

Action sur g par baisse de tension au stator (moteur à cage).

La variation Δn est mise en évidence par les points d'intersection avec C_r .

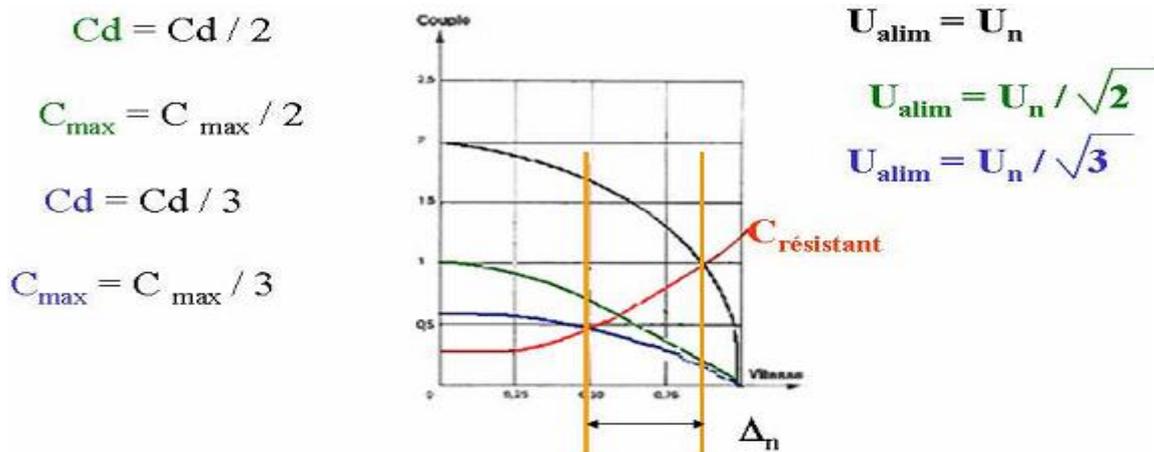
- Rotor à cage normale

Seule une faible variation de vitesse Δn est permise au delà le moindre supplément de C_r entraîne une instabilité, et le décrochage du moteur.

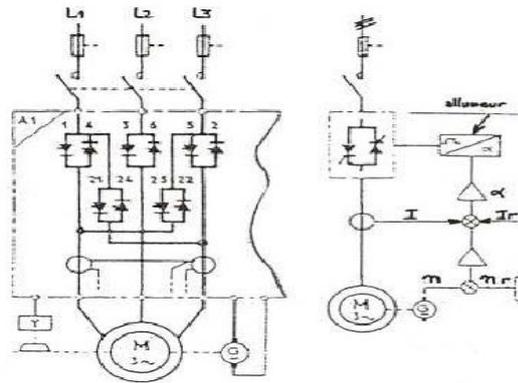


- Rotor à cage résistante:

Ici on obtient une variation plus importante.

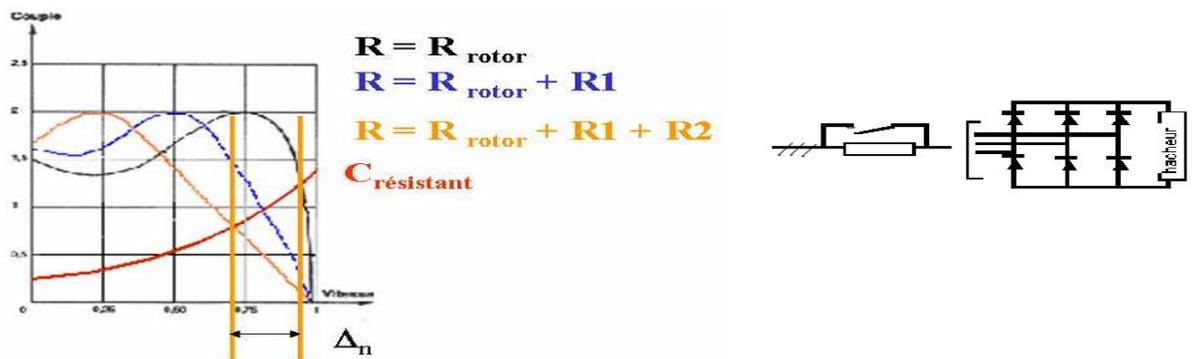


Réalisation avec utilisation d'un gradateur à thyristors "STATOVAR" (Télémechanique).



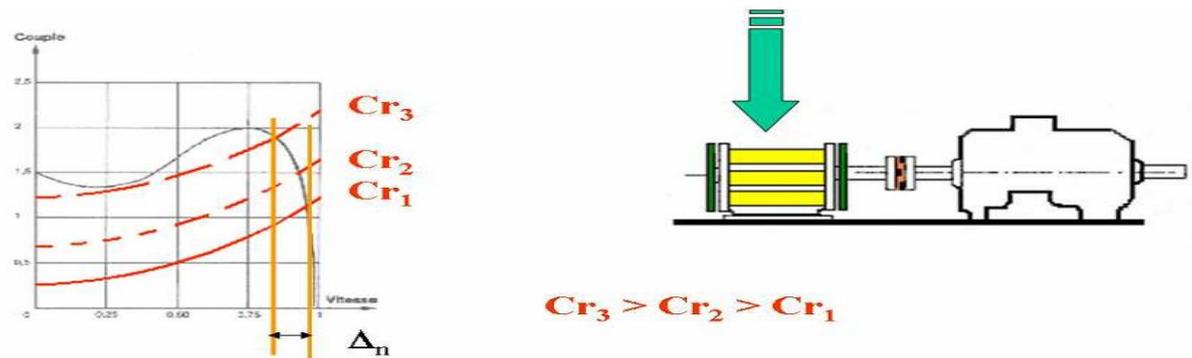
Action sur g par augmentation de la résistance rotorique (moteur à bagues).

Les résistances rotoriques sont prévues pour supporter le fonctionnement en petite vitesse. Elles dissipent l'énergie à l'extérieur du moteur. Elles sont en général fermées par un point redresseur lui même court circuit par un hacheur qui ajuste ainsi la résistance rotorique.



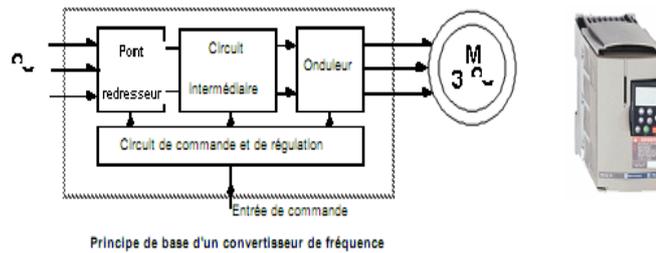
Action sur g par addition d'un couple de freinage

On utilise en général un ralentisseur à courants de FOUCAULT.



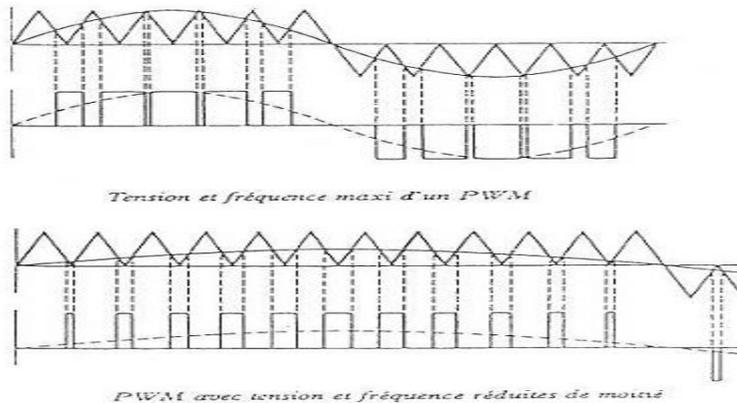
ACTION SUR f:

On utilise l'association d'un redresseur, un hacheur, et un onduleur.



La conception des quatre circuits principaux (redresseur - circuit intermédiaire - onduleur - circuit de commande et de régulation) dépend essentiellement du type de convertisseur considéré.

Convertisseur de fréquence à largeur d'impulsions modulées (PWM).



II.5-Réglage de la vitesse des moteurs asynchrones par convertisseur statique:

La pulsation du rotor d'un moteur asynchrone est :

$$\Omega = \Omega_s (1 - g) = \frac{\omega}{p} (1 - g) = \frac{2 \times \pi \times f}{p} (1 - g)$$

avec

g : glissement

p : nombre de paires de pôles

Ω : pulsation du rotor (en rd/s)

Ω_s : pulsation de synchronisme(en rd/s)

f : fréquence de la tension (Hz)

w: pulsation de la tension (rd/s)

Le réglage de la vitesse de rotation du moteur peut donc être obtenu par :

II.5.1-Action sur le nombre de paires de pôles :

- machines à bobinage primaire unique (couplage d'enroulements du type Dahlander)
- machines à plusieurs bobinages primaires (machines à enroulements séparés)

II.5.2- Action sur la fréquence de la tension d'alimentation statorique :

- convertisseurs de fréquence électromécaniques (gros alternateur pilotant plusieurs moteurs asynchrones tournant à la même vitesse)
- convertisseurs statiques (onduleurs de courant, de tension, M.L.I, contrôle vectoriel de flux, Cycloconvertisseur)

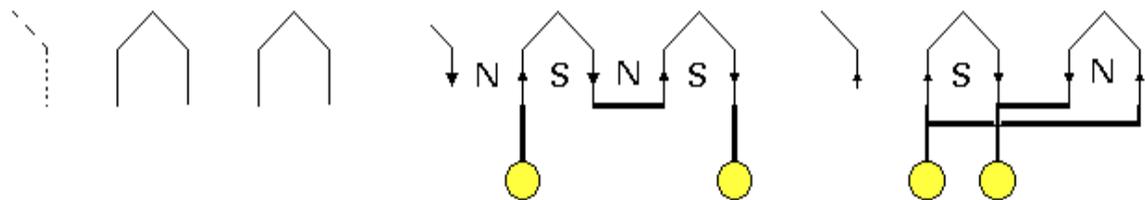
II.5.3-Action sur le glissement :

- action sur la tension d'alimentation statorique (autotransformateur, gradateur)
- rhéostat de glissement au rotor
- cascade de récupération (cascade hyposynchrone)

II.5.4-Action sur le nombre de paires de pôles :

- **Couplage d'enroulements (moteur de type Dahlander):**

Principe : ce type de moteur possède 2 bobinages distincts par phase, qui peuvent être couplés en série (4 pôles) ou en parallèle (2 pôles)



La vitesse de synchronisme varie donc dans le rapport 2 et la grande vitesse correspond au couplage parallèle

$$\frac{C_{gv}}{C_{pv}} = \frac{V_{gv}}{2 \times V_{pv}}$$

On admit que:

Avec:

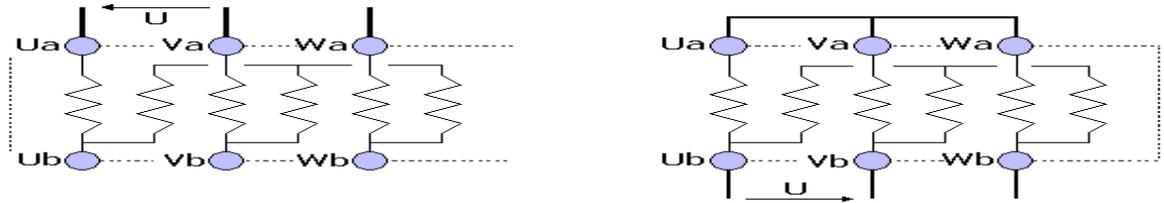
C_{gv} : couple en grande vitesse

C_{pv} : couple en petite vitesse

V_{gv} : tension aux bornes de l'enroulement « grande vitesse »

V_{pv} : tension aux bornes de l'enroulement « petite vitesse »

- Couplage série - étoile (petite vitesse) / parallèle - étoile (grande vitesse):



$$\frac{C_{gv}}{C_{pv}} = \frac{V_{gv}}{2 \times V_{pv}} = \frac{\frac{U}{\sqrt{3}}}{2 \times \frac{U}{2}} = 1$$

Ce type de couplage convient bien à une charge dont le couple est constant (treuil)

- Couplage série - triangle (petite vitesse) / parallèle - étoile (grande vitesse):



$$\frac{C_{gv}}{C_{pv}} = \frac{V_{gv}}{2 \times V_{pv}} = \frac{\frac{U}{\sqrt{3}}}{2 \times \frac{U}{2}} = 0,58$$

et

$$\frac{P_{gv}}{P_{pv}} = \frac{C_{gv}}{C_{pv}} \times \frac{D_{gv}}{D_{pv}} = 0,58 \times 2 = 1,16$$

Ce type de couplage convient lorsque la machine entraînée travaille à puissance constante

Remarque :

Les connexions externes de la plaque à borne sont les mêmes pour les deux types de couplage précédents

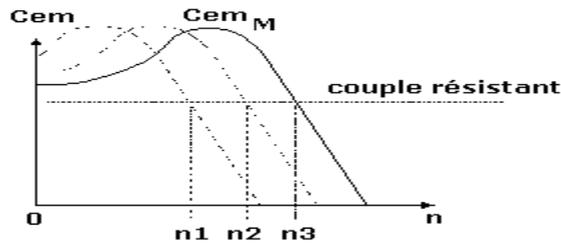
- Moteur à enroulements séparés :

C'est l'assemblage de deux moteurs ayant des vitesses et des couples différents. L'encombrement est plus important, mais le rapport des vitesses peut être différent de 2.

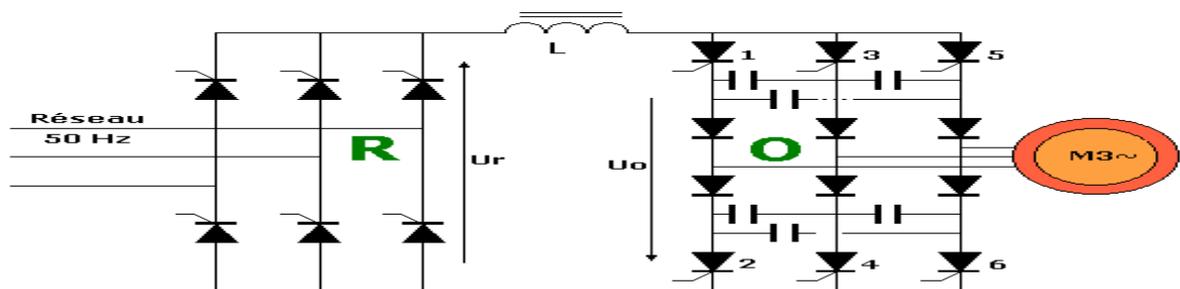
II.5.5- Action sur la fréquence de la tension statorique :

Le convertisseur statique de type "onduleur" permet un fonctionnement du moteur avec un couple maximal, par action simultanée sur la fréquence et sur l'amplitude de la tension.

statorique, avec conservation du rapport U/f

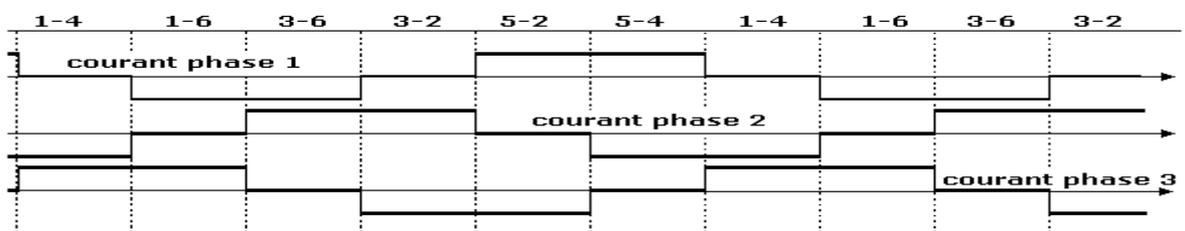


- Convertisseur à onde de courant:

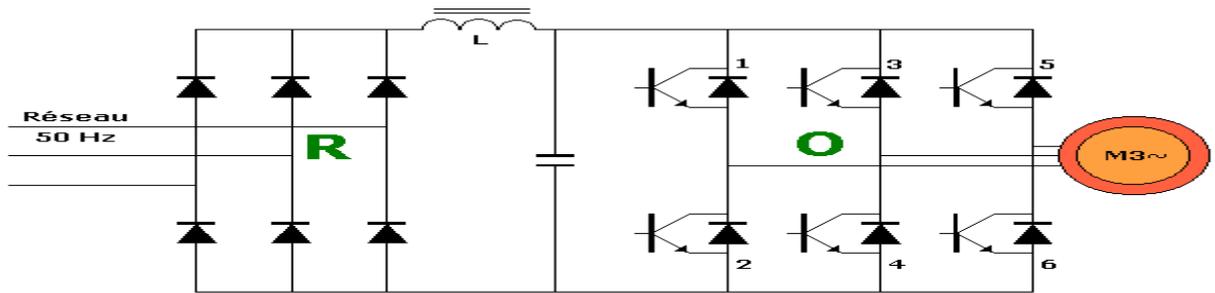


Le convertisseur R fait varier la valeur moyenne de la tension U_r . Le convertisseur O change la fréquence de la tension statorique. Les condensateurs assurent le blocage forcé des thyristors. Les diodes évitent la décharge des condensateurs dans les phases du moteur. Une petite inductance (non représentée) en série avec chaque thyristor limite les di/dt . Le courant circulant dans l'inductance L est fortement lissé

L'inversion de la séquence de commande des thyristors permet l'inversion du sens de rotation du moteur. Le freinage par récupération a lieu lorsque la fréquence de rotation du moteur est supérieure à la fréquence de synchronisme : O fonctionne alors en redresseur et R en onduleur assisté



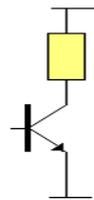
- Convertisseur à onde de tension :



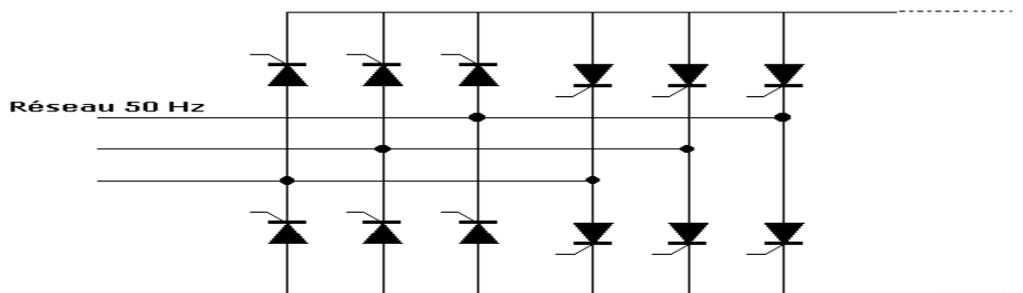
Le filtre L-C, associé au pont redresseur à diodes constitue une source de tension. L'onduleur à transistors génère une succession d'impulsions de tension, de largeurs variables (M.L.I.). Le moteur, inductif par nature, lisse le courant. Ce dernier est pratiquement sinusoïdal

Le freinage peut se faire :

- par adjonction d'une hachure de freinage (résistance) sur la source de tension



- par remplacement du redresseur à diodes par 2 ponts à thyristors montés tête - bêche (freinage par récupération d'énergie)

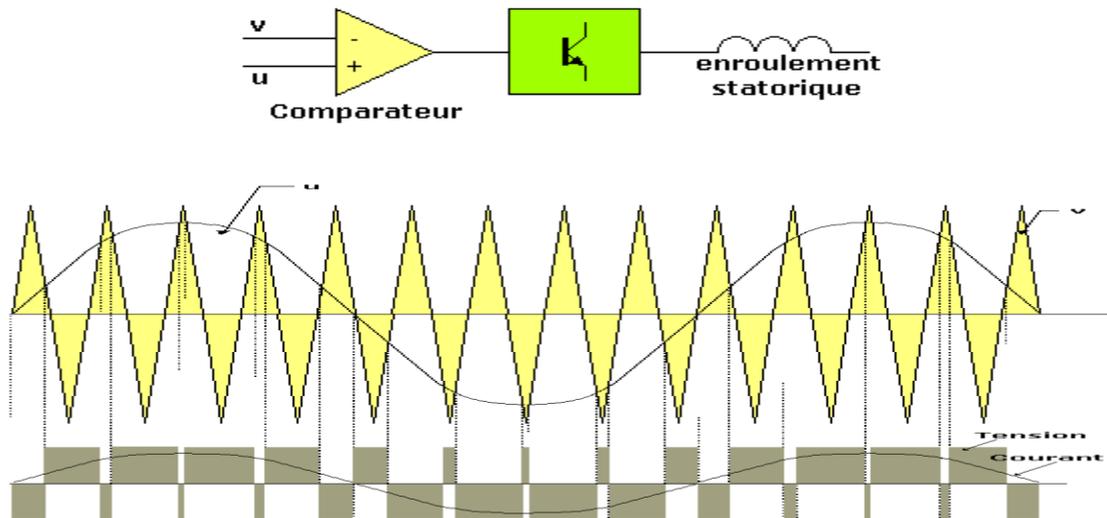


- Principe de la M.L.I. (Modulation de Largeur d'Impulsion):

Ou P.W.M. (Pulse Width Modulation)

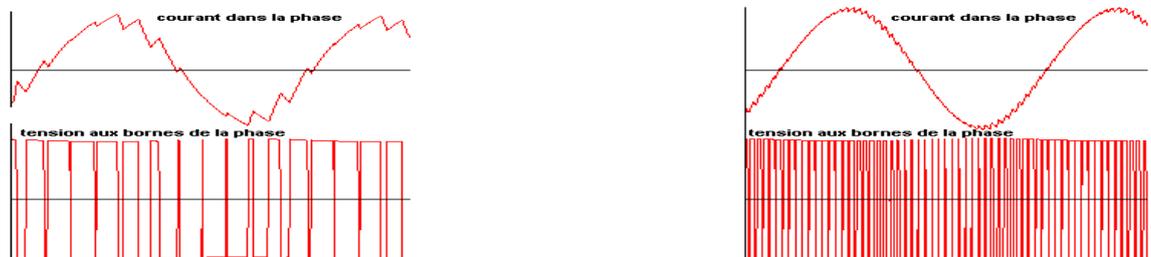
Une onde modulatrice sinusoïdale u , de fréquence f_u est comparée à une onde triangulaire v de fréquence f_v . La sortie du comparateur permet, par l'intermédiaire de transistors de puissance, le pilotage d'une phase de la machine. Les autres phases sont pilotées par des

ensembles identiques, déphasés de 120° Pour éliminer les harmoniques de rang pair et les harmoniques de rang 3, le rapport de modulation $m=f_v/f_u$ est impair, multiple de 3 et de l'ordre de la centaine (dans l'exemple ci-dessous $m=9$)



Le courant, filtré par l'inductance de l'enroulement est quasi – sinusoïdal

Allure des courants et tension (onduleur monophasé) pour des rapports de modulation différents:



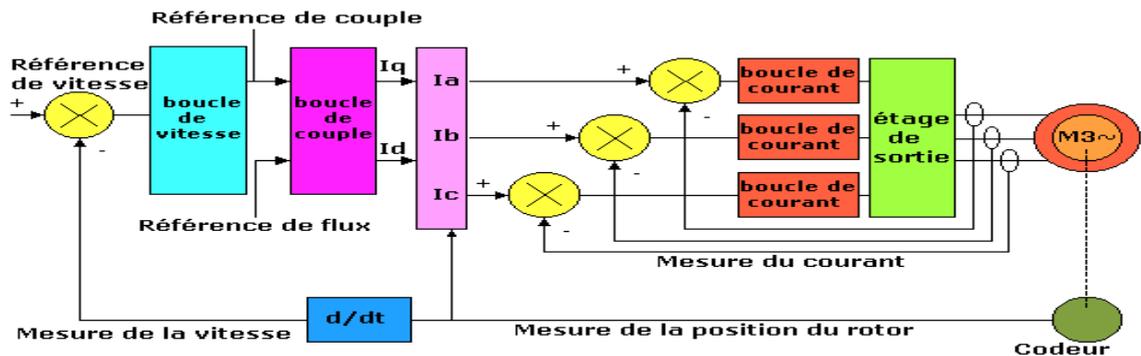
- Pilotage par contrôle vectoriel de flux :

Sur une machine asynchrone à cage, la complexité de ce type de commande vient du fait qu'on ne dispose que des bornes des enroulements statoriques, pour maîtriser au niveau du rotor, le flux et le courant actif, ces deux grandeurs étant fortement couplées. De plus, il faut retrouver la quadrature entre I et Φ

Un développement mathématique complexe montre que les courants statoriques triphasés peuvent se décomposer en un système de courants biphasés I_q et I_d :

- le couple est fonction d'un courant statorique I_q
- le flux est fonction d'un courant statorique I_d (en quadrature avec I_q)

Des signaux M.L.I. générés à partir de calculs très rapides effectués par un microcontrôleur, sont envoyés à des transistors de sortie, à partir des informations de position et de vitesse du rotor, délivrées par un codeur ou un résolve



Ce type de pilotage permet un excellent contrôle des paramètres couple et vitesse. Le couple est très élevé (supérieur au couple nominal) même à vitesse nulle

- Analogie avec la machine à courant continu

L'expression générale du couple moteur est donnée par la relation :

$$\vec{C} = K \times (\vec{I} \wedge \vec{\Phi})$$

\wedge est la notation du produit vectoriel

I est le courant d'induit

Φ est le flux imposé par l'enroulement inducteur ou les aimants permanent

$$\Rightarrow C = K \times I \times \Phi \times \sin\alpha$$

Dans une machine à courant continu I et Φ sont en quadrature

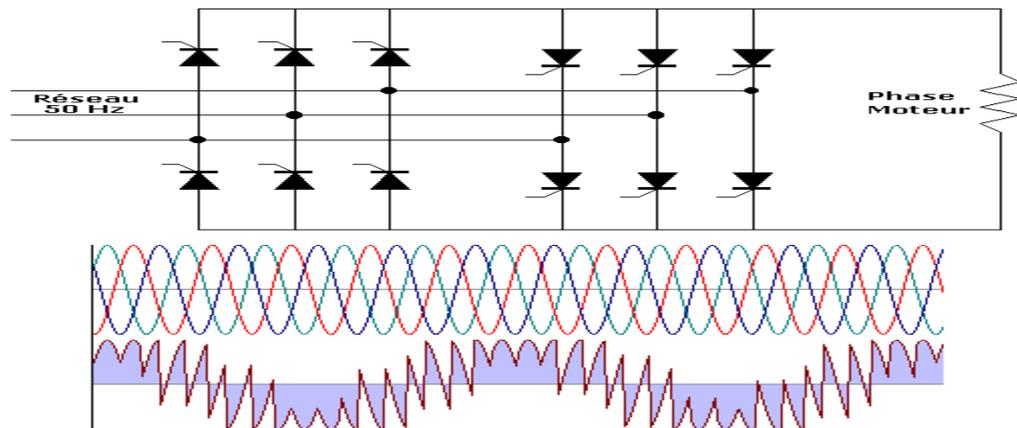
$$\Rightarrow \sin\alpha = 1 \Rightarrow C = K \times I \times \Phi$$

- Cycloconvertisseur:

C'est un convertisseur de fréquence, dont la fréquence de sortie est faible devant celle du réseau d'alimentation (1/3 maximum)

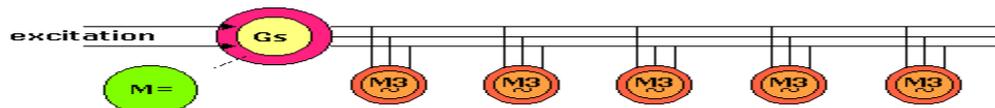
Le montage complet nécessite 36 thyristor pour une machine triphasée

Etude simplifiée pour une phase du moteur :



- Convertisseur de fréquence électromécanique :

Ce procédé, robuste et fiable est néanmoins lourd, encombrant et onéreux. Il est utilisé principalement pour piloter un grand nombre de moteurs asynchrones à régler simultanément (laminoirs)

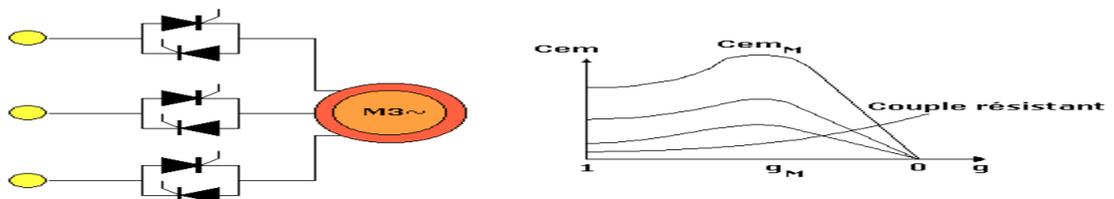


Le réglage de la vitesse du moteur à courant continu permet de fixer la fréquence de la tension de sortie de l'alternateur. L'amplitude de cette tension est ajustée par le circuit d'excitation de l'alternateur.

- Action sur le glissement :

-Gradateur :

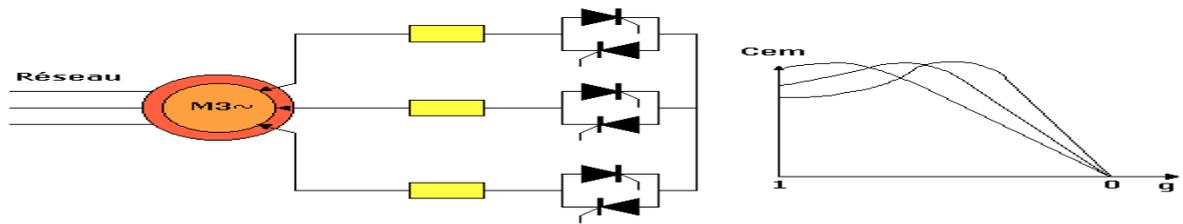
L'action se fait sur la tension statorique



Du fait de sa faible plage de variation de vitesse sur moteur à cage standard, le gradateur statorique est surtout utilisé comme procédé de démarrage sur des machines dont le couple résistant est de type parabolique

- Rhéostat de glissement rotorique :

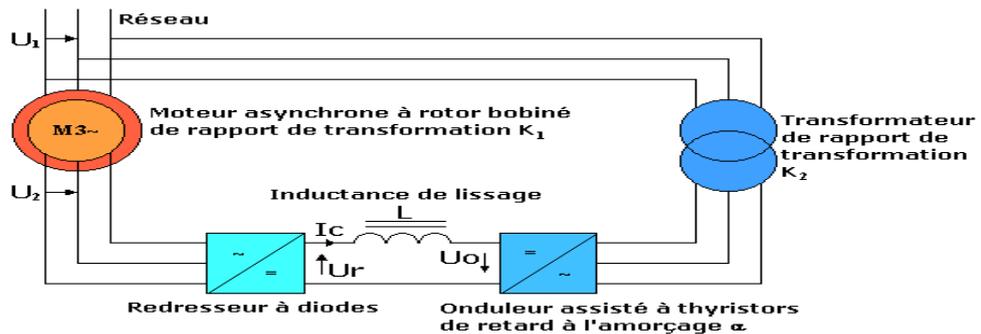
Cette technique est utilisée sur moteur à rotor bobiné



Le couple peut être maximal dans toute la plage de variation de vitesse, mais les pertes dans le rhéostat rotorique sont d'autant plus importantes que la vitesse du moteur est faible

- Cascade hyposynchrone :

Cette technique est utilisée sur moteur à rotor bobiné



$$U_2 = g \times K_1 \times U_1$$

$$U_r = \frac{3 \times \sqrt{2}}{\pi} \times U_1 \times K_1 \times g$$

$$U_o = \frac{3 \times \sqrt{2}}{\pi} \times U_1 \times K_2 \times \cos\alpha$$

$$\overline{U_r} = -\overline{U_o}$$

$$\Rightarrow g = -\frac{K_2}{K_1} \times \cos\alpha \quad \text{avec } 90^\circ < \alpha < 150^\circ$$

pour $\alpha = 90^\circ$, $g = 0$, $\Omega = \Omega_s$

pour $\alpha = 150^\circ$, $g = g_{\max} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \frac{K_2}{K_1}$, $\Omega = \Omega_{\min}$

Le transformateur est choisi avec un rapport de transformation permettant le glissement maximal souhaité. La récupération de l'énergie rotorique assure un excellent rendement, voisin de celui du moteur seul. Le facteur de puissance de la cascade est plus faible que celui du moteur seul et il y a nécessité de le relever avec une batterie de condensateurs.

La cascade ne peut démarrer seule : il est nécessaire de prévoir un dispositif annexe de démarrage par résistances rotoriques.

II .6-CONCLUSION:

Dans ce chapitre nous avons étudié tous les points fondamentaux concernant un système moteur qui a une efficacité énergétique satisfaisante et qu'on peut les résumés comme suit:

- Méthodes de réglage du débit d'une pompe centrifuge
- Régulation du débit par variation de la vitesse de rotation
- Schéma équivalent
- Réglage de la vitesse des moteurs asynchrones par convertisseur statique.

Chapitre III

Modélisation et commande de l'installation moteur – pompe

III. 1.Introduction:

Concernant la machine asynchrone, on distingue deux types de commandes, les commandes scalaires et les commandes vectorielles.

Le modèle de la machine asynchrone présenté traditionnellement en cours est un modèle "régime permanent".

C'est à dire que la machine est supposée fonctionner en régime établi, qu'elle est alimentée avec sous un système triphasé de valeur efficace constante et qu'elle tourne à une vitesse constante. Les grandeurs sont alors sinusoïdales et l'approche dans l'espace complexe est valable (vecteurs de Fresnel). Ce modèle n'est plus valable si la machine est alimentée par un onduleur triphasé commandé suivant un schéma de contrôle.

Le contrôle de vitesse le plus simple, dit en "V sur f", permet de varier la vitesse de la machine sur une large plage. C'est un contrôle scalaire. Les équations de la machine qui permettent de calculer le couple et de prévoir les points de fonctionnement sont basées sur le modèle "régime permanent" de la machine.

Il existe un schéma de contrôle basé sur le modèle "transitoire" ou "dynamique" de la machine qui est le contrôle vectoriel de la machine.

Ce type de contrôle permet d'avoir une dynamique de réponse plus rapide et une meilleure précision du contrôle du couple. Il est cependant plus difficile à implanter puisqu'il requiert plus de puissance de calcul en temps réel de la part de l'organe de commande (microcontrôleur, DSP Digital Signal Processor) du variateur.

III.2 Contrôle vectoriel:

En effet, cette commande nécessite des calculs de transformés de Park, de fonctions trigonométriques, des intégrations, des régulations, ce qui ne pouvait pas se faire avec de l'électronique purement analogique ni avec des microprocesseurs ou des microcontrôleurs trop lents.

Donc il nous faut un modèle de la machine asynchrone qui permet de simuler son fonctionnement en régime transitoire et qui permet de déboucher sur une commande suivant un schéma de contrôle vectoriel indirect par orientation du flux rotorique.

Nous n'aborderons dans ce chapitre que la commande vectorielle à flux rotorique orienté.

III.2.1 Modèle transitoire de la machine asynchrone :

Nous allons établir un modèle de la machine asynchrone en régime transitoire afin de poser les bases de la commande vectorielle et d'en comprendre le principe .

La modélisation complète étant hors de portée de ce cours, nous expliquerons les grandes

étapes et les résultats de la modélisation.

III.2.2.1 Hypothèses de travail:

Pour cette mise en équation, nous supposons que le bobinage est réparti de manière à donner une f.m.m. sinusoïdale s'il est alimenté par des courants sinusoïdaux.

Nous supposons également que nous travaillons en régime non saturé. Nous négligeons le phénomène d'hystérésis, les courants de Foucault et l'effet de peau.

Enfin, le régime homopolaire est nul puisque le neutre n'est pas relié.

Ces choix signifient entre autres que :

- les flux sont additifs
- les inductances propres sont constantes
- il y a une variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements statoriques

et rotoriques en fonction de l'angle électrique de leurs axes magnétiques.

III.2.2.2 Les équations de la machine asynchrone en régime quelconque:

Pour plus de détails concernant la mise en équation, on pourra se référer à [MAY05], [CH95], ou encore [LNS81].

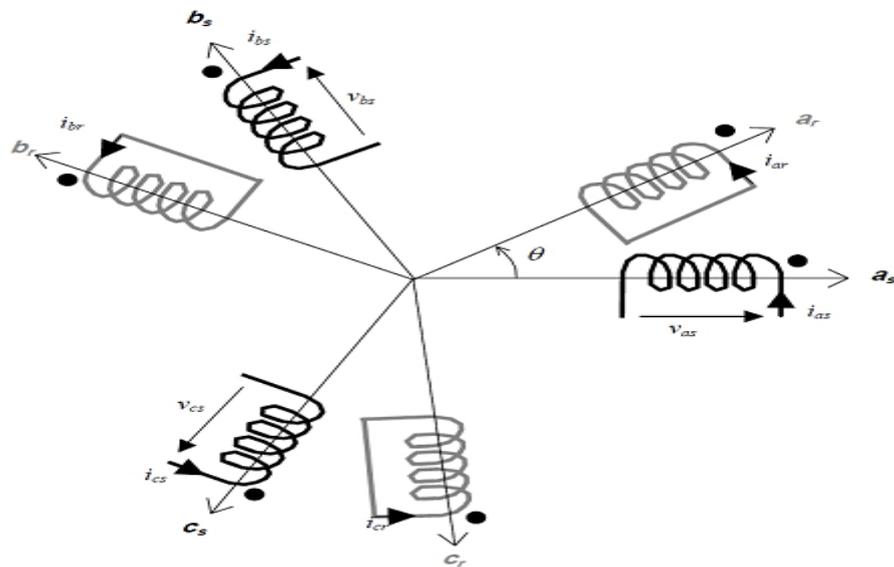


Figure III.1 : Représentation des enroulements statoriques et rotoriques d'une machine asynchrone à rotor bobiné

Les enroulements des trois phases statoriques et des trois phases rotoriques dans l'espace peuvent être représentés comme l'indique la figure III.1. Les phases rotoriques sont court-circuitées sur elles mêmes. θ est l'angle électrique entre l'axe de la phase a statorique et la phase a rotorique.

La loi de Faraday permet d'écrire :

$$v = Ri + \frac{d\phi}{dt}$$

Pour les trois phases statoriques, cette formule donne l'écriture matricielle :

$$\begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \end{bmatrix}$$

que l'on peut condenser en :

$$[v_{abcs}] = [R_s] [i_{abcs}] + \frac{d}{dt} [\phi_{abcs}] \quad (3.1)$$

Le rotor étant en court-circuit, les tensions sont nulles et on écrira :

$$[v_{abcr}] = [R_r] [i_{abcr}] + \frac{d}{dt} [\phi_{abcr}] = [0] \quad (3.2)$$

Le flux baignant une phase est produit par le courant passant dans le bobinage de la phase et par les courants des autres phases par le biais des mutuelles inductances. On note :

- ls l'inductance propre d'une phase statorique ;
- lr l'inductance propre d'une phase rotorique ;
- ms l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques ;
- mr l'inductance mutuelle entre deux phases rotoriques ;
- msr le maximum de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

Les coefficients instantanés de mutuelle inductance entre le rotor et le stator s'expriment en fonction de θ , on pose :

m_1 la mutuelle inductance entre a_s et a_r , avec :

$$m_1 = m_{kr} \cdot \cos(\theta)$$

m_2 la mutuelle inductance entre a_s et c_r , avec :

$$m_2 = m_{sr} \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$$

m_3 la mutuelle inductance entre a_s et b_r , avec :

$$m_3 = m_{sr} \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right)$$

ATTENTION : la mutuelle entre la phase statorique a_s et la phase rotorique b_r sera donc m_3

conformément à la figure III.1. Ainsi, le flux total pour la phase a, s'écrira par exemple :

$$\phi_{as} = \underbrace{l_s i_{as} + m_s i_{bs} + m_s i_{cs}}_{\text{flux dus aux courants statoriques}} + \overbrace{m_1 i_{ar} + m_3 i_{br} + m_2 i_{cr}}^{\text{flux dus aux courants rotoriques}}$$

Pour toutes les phases, cela donne lieu à l'écriture matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \phi_{as} \\ \phi_{bs} \\ \phi_{cs} \\ \phi_{ar} \\ \phi_{br} \\ \phi_{cr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s & | & m_1 & m_3 & m_2 \\ m_s & l_s & m_s & | & m_2 & m_1 & m_3 \\ m_s & m_s & l_s & | & m_3 & m_2 & m_1 \\ \hline m_1 & m_2 & m_3 & | & l_r & m_r & m_r \\ m_3 & m_1 & m_2 & | & m_r & l_r & m_r \\ m_2 & m_3 & m_1 & | & m_r & m_r & l_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \\ i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

La matrice des flux réels fait apparaître quatre sous-matrices d'inductances :

$$\begin{bmatrix} \phi_{abcs} \\ \phi_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [L_s] & [M_{sr}] \\ [M_{rs}] & [L_r] \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & m_s & m_s \\ m_s & l_s & m_s \\ m_s & m_s & l_s \end{bmatrix}$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r & m_r & m_r \\ m_r & l_r & m_r \\ m_r & m_r & l_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = m_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

$$[M_{rs}] = [M_{sr}]^t$$

Finalement :

$$[v_{abcs}] = [R_s] \cdot [i_{abcs}] + \frac{d}{dt} ([L_s] \cdot [i_{abcs}] + [M_{sr}] \cdot [i_{abcr}]) \quad (3.5)$$

$$[v_{abcr}] = [R_r] \cdot [i_{abcr}] + \frac{d}{dt} ([M_{sr}]^t \cdot [i_{abcs}] + [L_r] \cdot [i_{abcr}]) \quad (3.6)$$

III.2.2.3 Transformation de Park:

La transformation de Park est constituée d'une transformation triphasée diphasée suivie d'une rotation.

Elle permet de passer du repère abc vers le repère $\alpha\beta$ puis vers le repère dq. Le repère $\alpha\beta$ est toujours fixe par rapport au repère abc (voir la figure III.1), par contre le repère dq est mobile. Comme le montre la figure III.2, il forme avec le repère fixe $\alpha\beta$ un angle qui est appelé l'angle de la transformation de Park ou angle de Park.

La matrice de rotation 3x3 s'écrira :

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Suivant la figure III.2, on aura donc :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_o \end{bmatrix}$$

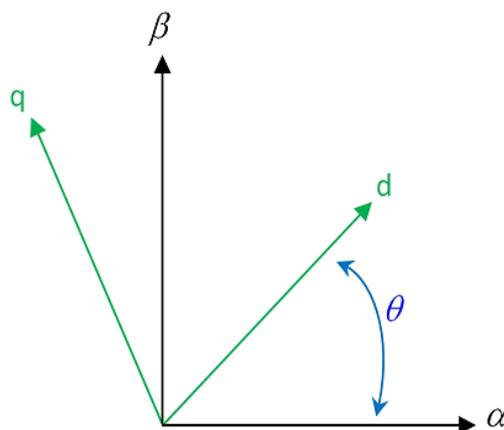


Figure III.2 . Rotation du système $\alpha\beta$ vers le système d q.

i_d représente l'axe direct et i_q l'axe en quadrature « avant ». i_o représente la composante homopolaire perpendiculaire au plan de la figure III.2. On remarque que $[R(-\theta)] = [R(\theta)]^{-1}$

La transformation de Concordia conserve la puissance instantanée, on utilisera cette

transformation pour réaliser la transformation de Park qui conserve la puissance. $[P(\theta)] = [R(\theta)][Co]$

Pour les courants, cela donnera :

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Soit :

$$[idqo] = [P(\theta)][iabc]$$

Avec :

$$[P(\theta)] = [R(\theta)][Co]$$

La transformée inverse sera :

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{bmatrix}$$

soit :

$$[i_{abc}] = [P(\theta)]^{-1} [i_{dqo}]$$

Cette matrice est orthogonale, soit : $[P(\theta)]^t [P(\theta)] = 1$ ou $[P(\theta)]^{-1} = [P(\theta)]^t$.

Il est à noter que, dans la littérature, la matrice que nous avons définie comme $[P(\theta)]$ est souvent appelée « transformée inverse de Park », par conséquent, son inverse est alors appelée « transformation directe de Park ».

La transformation de Park peut s'interpréter comme suit :

Les machines triphasées à champ tournant comportent trois enroulements fixes, décalés de 120° le long de l'entrefer et parcourus par trois courants alternatifs triphasés (décalés dans le temps de deux tiers de période). En vertu du théorème de Ferraris, ceci donne naissance à un champ magnétique tournant à la vitesse $\omega_s = f$ pet dont l'amplitude est constante au cours du temps.

La transformation de Park permet de remplacer le système réel par un système composé de :

- deux enroulements tournants à la vitesse angulaire $\dot{\theta}_s = \omega_s$ et parcourus par les courants i_d et i_q
- un enroulement fixes, parcouru par le courant homopolaire i_o .

Le système équivalent donne naissance à un champ tournant dans l'entrefer qui est identique à celui créé par les trois enroulements décalés de 120° et parcourus par des courants triphasés.

III.2.2.4 Mise en équations de la machine asynchrone en coordonnées de Park:

La machine asynchrone a été modélisée en utilisant deux repères séparés : un pour exprimer les grandeurs statoriques et l'autre pour exprimer les grandeurs rotoriques. Ces deux repères étant liés par l'angle θ , un modèle de la machine dans un repère tournant unique (repère dq) peut être obtenu à l'aide de deux matrices de rotation.

La figure III.3 montre la disposition des systèmes d'axes diphasés et triphasés dans l'espace électrique. À un instant donné, la position du champ magnétique tournant dans l'entrefer est repérée par l'angle θ_s par rapport à l'axe immobile \vec{O}_{as} . Pour développer le modèle de la machine, on considère un repère de Park aligné avec ce champ magnétique et tournant à la même vitesse ω_s . L'angle θ_s correspond à l'angle entre les axes \vec{O}_{as} et \vec{O}_d tandis que l'angle θ_r correspond à l'angle entre les axes \vec{O}_{ar} et \vec{O}_d .

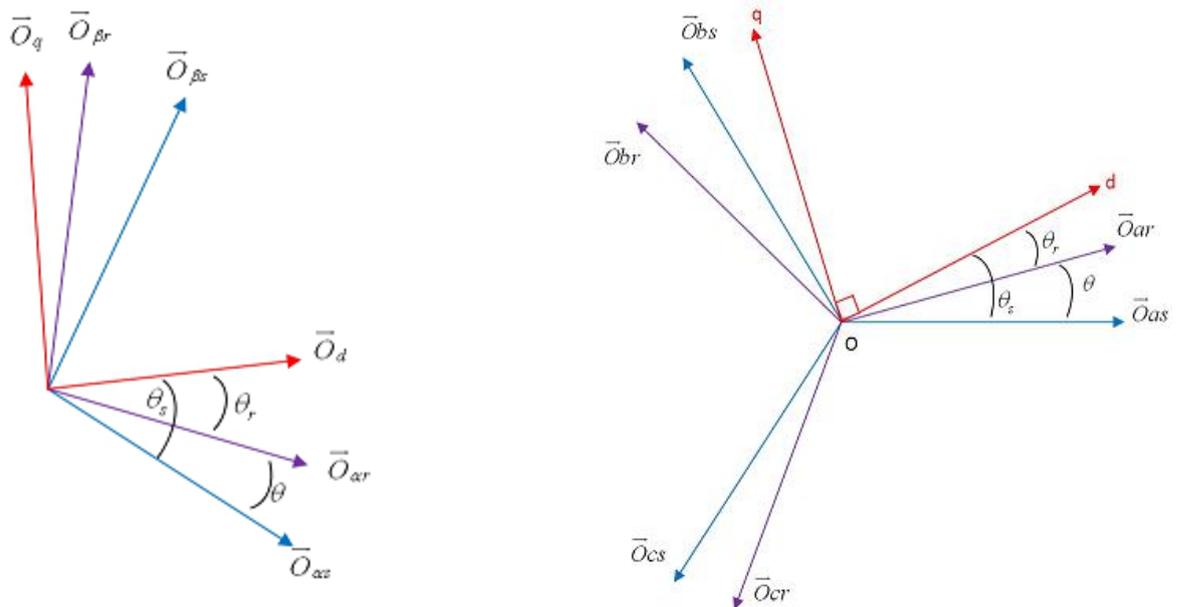


Figure III.3. Représentation angulaire des systèmes d'axes dans l'espace électrique.

Une transformation d'angle θ_s est nécessaire pour ramener les grandeurs du stator dans le repère tournant de Park et une transformation d'angle θ_r pour les grandeurs du rotor. En observant la figure III.3, on constate que, pour

exprimer les grandeurs statoriques et rotoriques dans un même repère de Park $(O, \vec{O}_d, \vec{O}_q)$, les angles sont liés par la relation : $\theta_s = \theta + \theta_r$

L'angle $\theta = \theta_s - \theta_r$ correspond à la position du rotor par rapport au stator dans la machine, il peut être mesuré par un codeur solidaire du rotor.

De la relation entre les angles, nous pouvons établir une relation entre les vitesses du

référentiel dans chaque repère et la vitesse mécanique :

$$\theta_s = \theta + \theta_r \Rightarrow \frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt} \Rightarrow \omega_s = \omega + \omega_r$$

$$\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}, \omega_r = \frac{d\theta_r}{dt}, \omega = p\Omega = \frac{d\theta}{dt}$$

Ω étant la vitesse mécanique, et ω cette même vitesse vue dans l'espace électrique, la vitesse des grandeurs rotoriques est donc de ω_r par rapport à la vitesse ω du rotor. Par rapport au repère du stator, les grandeurs rotoriques tournent donc à la même vitesse ω que les grandeurs statoriques.

L'utilisation de la transformation de Park va permettre de concevoir un modèle de la machine asynchrone indépendant de la position du rotor que l'on appellera « machine de Park ». La représentation de Park de la machine asynchrone est schématisée à la figure III.4. Les axes magnétiques d et q sont perpendiculaires entre eux et l'axe 0 (ou homopolaire) est perpendiculaire au plan décrit par d et q, il est dessiné à l'écart pour plus de clarté visuelle.

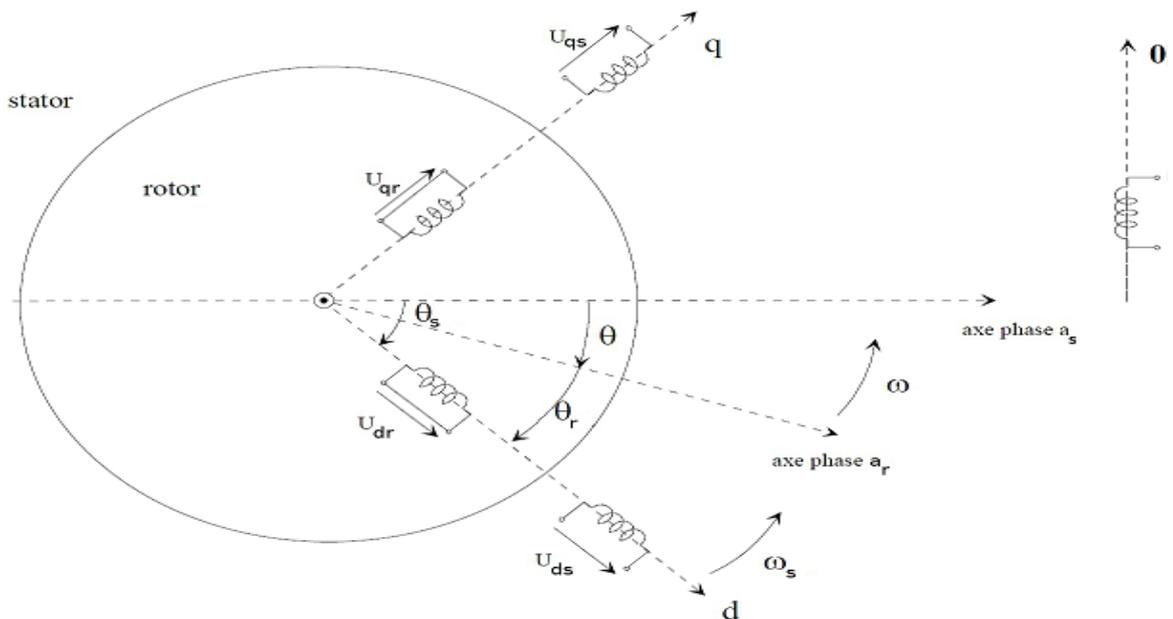


Figure III.4 : Représentation de la machine asynchrone de Park.

Les angles θ_s et θ_r représentent respectivement l'angle électrique entre la phase a_s statorique et l'axe d de Park et celui entre la phase a_r rotorique et l'axe d de Park. L'enroulement homopolaire du rotor n'est pas représenté à cause de son influence inexistante.

Deux transformations sont utilisées, l'une $[P(\theta_s)]$ est appliquée aux grandeurs du stator, l'autre $[P(\theta_r)]$ est appliquée aux grandeurs du rotor :

$$\begin{cases} [x_{dqo-s}] = [P(\theta_s)][x_{abc-s}] \\ [x_{dqo-r}] = [P(\theta_r)][x_{abc-r}] \end{cases}$$

Les composantes directe et en quadrature x_d et x_q représentent les grandeurs, qui correspondent aux coordonnées x_a, x_b, x_c , dans un repère orthogonal tournant dans le même plan. Le terme $x_o = k \times (i_a + i_b + i_c)$, avec k constante,

représente la composante homopolaire, orthogonale au plan formé par le système x_a, x_b, x_c .

III.2.2.4.1 Équations électriques:

Exprimons les matrices colonnes des grandeurs triphasées ($[v_{abc}]$, pour les tensions, $[i_{abc}]$ pour les courants et $[\phi_{abc}]$ pour les flux) en fonction des matrices colonnes des composantes de Park ($[v_{abcP}]$, pour les tensions, $[i_{abcP}]$

pour les courants et $[\phi_{abcP}]$ pour les flux) : $[v_{abc}] = [P(\theta_s)]^{-1} [v_{abcP}]$

$$[i_{abc}] = [P(\theta_s)]^{-1} [i_{abcP}]$$

$$[\phi_{abc}] = [P(\theta_s)]^{-1} [\phi_{abcP}]$$

$$[v_{abc}] = [R_s] [i_{abc}] + \frac{d}{dt} [\phi_{abc}]$$

$$[P(\theta_s)]^{-1} [v_{abcP}] = [R_s] [P(\theta_s)]^{-1} [i_{abcP}] + \frac{d([P(\theta_s)]^{-1} [\phi_{abcP}])}{dt}$$

La formule de la dérivée d'un produit permet d'écrire :

$$[P(\theta_s)]^{-1} [v_{abcP}] = [R_s] [P(\theta_s)]^{-1} [i_{abcP}] + [P(\theta_s)]^{-1} \frac{d([\phi_{abcP}])}{dt} + \frac{d([P(\theta_s)]^{-1})}{dt} [\phi_{abcP}]$$

Multiplions à gauche par la matrice de Park :

$$[v_{abcP}] = [R_s] [i_{abcP}] + \frac{d([\phi_{abcP}])}{dt} + [P(\theta_s)] \frac{d([P(\theta_s)]^{-1})}{dt} [\phi_{abcP}]$$

Pour simplifier le dernier terme, écrivons la matrice de la transformation inverse de Park :

$$[P(\theta_s)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_s & -\sin \theta_s & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

Dérivons-la par rapport au temps :

$$\frac{d([P(\theta_s)]^{-1})}{dt} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} -\sin \theta_s & -\cos \theta_s & 0 \\ -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & 0 \\ -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & -\cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) & 0 \end{bmatrix} \times \frac{d\theta_s}{dt}$$

Effectuons le produit matriciel :

$$[P(\theta_s)] \cdot \frac{d([P(\theta_s)]^{-1})}{dt} = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \times \frac{d\theta_s}{dt}$$

En nous rappelant que :

$$[v_{abcsp}] = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{os} \end{bmatrix}$$

Nous pouvons en déduire les relations entre les composantes de Park :

$$\begin{aligned} v_{ds} &= R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \phi_{qs} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} \\ v_{qs} &= R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \phi_{ds} \cdot \frac{d\theta_s}{dt} \\ v_{os} &= R_s i_{os} + \frac{d\phi_{os}}{dt} \end{aligned}$$

Introduisons la vitesse angulaire électrique du repère d_q , définie par :

$$\omega_{dq} = \frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$$

Les expressions des tensions statoriques deviennent ainsi :

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \phi_{qs} \cdot \omega_s \quad (3.7)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \phi_{ds} \cdot \omega_s \quad (3.8)$$

Un calcul identique appliqué aux grandeurs rotoriques nous donne :

$$0 = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \phi_{qr} \cdot \frac{d\theta_r}{dt}$$

$$0 = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \phi_{dr} \cdot \frac{d\theta_r}{dt}$$

$$0 = R_r i_{or} + \frac{d\phi_{or}}{dt}$$

La relation entre les angles étant : $\theta_s = \theta + \theta_r$

La dérivée de cette relation est :

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} + \frac{d\theta_r}{dt}$$

Soit, en introduisant la vitesse de rotation $\omega_{dq} = \omega_s$ du repère d_q et la vitesse angulaire électrique $\omega = \frac{d\theta}{dt}$:

$$d\theta_r/dt = \omega_{dq} - \omega$$

Les expressions des tensions rotoriques deviennent ainsi :

$$0 = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \phi_{qr}(\omega_{dq} - \omega) \quad (3.9)$$

$$0 = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \phi_{dr}(\omega_{dq} - \omega) \quad (3.10)$$

III.2.2.4.2 Relations entre flux et courants:

Nous allons suivre un procédé similaire à celui du paragraphe 3.2.3.1. Partons de la relation :

$$[\phi_s] = [L_s][i_{abc}] + [M_{sr}][i_{abr}]$$

En multipliant à gauche par $[P(\theta_s)]$, il vient :

$$[\phi_{abc}P] = [P(\theta_s)][\phi_s] = [P(\theta_s)][L_s][i_{abc}] + [P(\theta_s)][M_{sr}][i_{abr}]$$

Pour calculer le premier terme de la somme du second membre, décomposons la matrice des inductances statoriques de la façon suivante :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s - m_s & 0 & 0 \\ 0 & l_s - m_s & 0 \\ 0 & 0 & l_s - m_s \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} m_s & m_s & m_s \\ m_s & m_s & m_s \\ m_s & m_s & m_s \end{bmatrix}$$

Soit :

$$[L_s] = (l_s - m_s) \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} + m_s \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Effectuons d'abord le produit à droite par la matrice colonne des courants :

$$[L_s][i_{abc}] = (l_s - m_s) \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + m_s \begin{bmatrix} i_{as} + i_{bs} + i_{cs} \\ i_{as} + i_{bs} + i_{cs} \\ i_{as} + i_{bs} + i_{cs} \end{bmatrix}$$

Effectuons ensuite le produit à gauche par la matrice de Park, en introduisant la composante

homopolaire $i_o = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{as} + i_{bs} + i_{cs})$ du courant statorique :

$$[P(\theta_s)][L_s][i_{abc}] = (l_s - m_s)[P(\theta_s)][i_{abc}] + \sqrt{3}m_s i_o [P(\theta_s)] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Nous voyons apparaître la matrice colonne des composantes de Park des courants statoriques :

$$[P(\theta_s)][i_{abc}] = [i_{abc}P]$$

Par ailleurs, effectuons le produit matriciel :

$$[P(\theta_s)] \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \sqrt{3} \end{bmatrix}$$

Nous arrivons à :

$$[P(\theta_s)][L_s][i_{abcs}] = \begin{bmatrix} (l_s - m_{sr}) i_{ds} \\ (l_s - m_{sr}) i_{qs} \\ (l_s + 2m_{sr}) i_{os} \end{bmatrix}$$

Considérons maintenant le second terme de la somme. La matrice des inductances mutuelles entre stator et rotor est :

$$[M_{sr}] = m_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Effectuons, pour commencer, le produit de la matrice de Park par la matrice des inductances mutuelles entre stator et rotor :

$$[P(\theta_s)][M_{sr}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_s) & \cos(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_s) & -\sin(\theta_s - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_s + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot m_{sr} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix}$$

Le calcul des coefficients de cette matrice nécessite la transformation des produits de fonction trigonométriques en sommes par les formules :

$$\cos a \cos b = \frac{1}{2} (\cos(a + b) + \cos(a - b))$$

$$\sin a \cos b = \frac{1}{2} (\sin(a + b) + \sin(a - b))$$

De plus, la somme de trois fonctions sinusoïdales déphasées de $2\pi/3$ est nulle :

$$\cos x + \cos\left(x - \frac{2\pi}{3}\right) + \cos\left(x + \frac{2\pi}{3}\right) = 0$$

Enfin, en utilisant la relation : $\theta = \theta_s - \theta_r$, nous obtenons :

$$[P(\theta_s)][M_{sr}] = \sqrt{\frac{3}{2}} m_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin \theta_r & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Il reste à effectuer le produit à droite avec la matrice colonne des courants du rotor. Comme nous l'avons vu :

$$i_{dr} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[i_{ar} \cdot \cos \theta + i_{br} \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{cr} \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right]$$

$$\Rightarrow \left[i_{ar} \cdot \cos \theta + i_{br} \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_{cr} \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \right] = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot i_{dr}$$

Il en est de même pour i_{qr} Cela fait apparaître les composantes directe et en quadrature de ces courants :

$$[P(\theta_s)][M_{sr}][i_{abcr}] = \frac{3}{2} m_{sr} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ 0 \end{bmatrix}$$

La relation entre les composantes de Park des flux et des courants s'écrit donc :

$$\begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \\ \phi_{os} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (l_s - m_{sr}) i_{ds} \\ (l_s - m_{sr}) i_{qs} \\ (l_s + 2m_{sr}) i_{os} \end{bmatrix} + \frac{3}{2} m_{sr} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ 0 \end{bmatrix}$$

que l'on peut écrire aussi :

$$\begin{bmatrix} \phi_{ds} \\ \phi_{qs} \\ \phi_{os} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (l_s - m_{sr}) & 0 & 0 \\ 0 & (l_s - m_{sr}) & 0 \\ 0 & 0 & (l_s + 2m_{sr}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{os} \end{bmatrix} + \frac{3}{2} m_{sr} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{os} \end{bmatrix}$$

On constate que l'on a ici des matrices diagonales, cela justifie l'intérêt de la transformation de Park.

Posons :

$$L_s = l_s - m_{sr}$$

$$L_{os} = l_s + 2m_{sr}$$

$$M = \frac{3}{2} m_{sr}$$

L_s est l'inductance cyclique du stator, L_{os} son inductance homopolaire et M est l'inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

Les expressions des composantes de Park des flux du stator sont alors :

$$\phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \quad (3.11)$$

$$\phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \quad (3.12)$$

$$\phi_{os} = L_{os} i_{os} \quad (3.13)$$

En posant :

$$L_r = l_r - m_{rs}$$

$$L_{or} = l_r + 2m_{rs}$$

où L_r est l'inductance cyclique du rotor et L_{or} son inductance homopolaire, nous obtenons de

la même façon des relations analogues pour les composantes de Park des flux du rotor :

$$\phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \quad (3.14)$$

$$\phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \quad (3.15)$$

$$\phi_{or} = L_{or} i_{or} \quad (3.16)$$

III.2.2. 5- Équations dans différents référentiels:

III.2.2.5.1 Référentiel lié au stator:

Dans un référentiel lié au stator, la vitesse ω_s est nulle. En remplaçant $\omega_s = \omega_{dq}$ par 0 dans L'équation 3..7 devient:

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt}$$

L'équation 3..8 devient :

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt}$$

L'équation 3..9 devient :

$$0 = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} + \phi_{qr} \cdot \omega$$

L'équation 3..10 devient :

$$0 = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \phi_{dr} \cdot \omega$$

III.2.2.5.2 Référentiel lié au rotor:

Dans un référentiel lié au rotor, la vitesse ω_s est égale à la vitesse électrique ω du rotor. Toujours en utilisant les équations, on obtient :

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \phi_{qs} \cdot \omega$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \phi_{ds} \cdot \omega$$

$$0 = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt}$$

$$0 = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt}$$

III.2.2.5.3 Référentiel lié au champ tournant:

Dans un référentiel lié au champ tournant, la vitesse ω_{dq} est égale à la pulsation statorique ω_s et la différence $\omega_{dq} - \omega$ est égale à $g\omega_s$, les équations conduisent à :

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \phi_{qs} \cdot \omega_s \quad (3.17)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \phi_{ds} \cdot \omega_s \quad (3.18)$$

$$0 = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - \phi_{qr} \cdot g \cdot \omega_s \quad (3.19)$$

$$0 = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + \phi_{dr} \cdot g \cdot \omega_s \quad (3.20)$$

III.2.2. 5.4 Calcul du couple:

Le couple électromagnétique peut être dérivé de l'expression de la co-énergie ou obtenu, comme ci-dessous à l'aide d'un bilan de puissance. La transformation de Park conserve la puissance instantanée, nous pouvons donc écrire :

$$p(t) = v_{as}(t) \cdot i_{as}(t) + v_{bs}(t) \cdot i_{bs}(t) + v_{cs}(t) \cdot i_{cs}(t) = v_{ds}(t) \cdot i_{ds}(t) + v_{qs}(t) \cdot i_{qs}(t)$$

En remplaçant dans l'expression précédente les valeurs de v_{ds} et v_{qs} tirées des équations 3.17 et 3.18 de la présente page, il vient :

$$p(t) = R_s \cdot (i_{ds}^2(t) + i_{qs}^2(t)) + \left(\frac{d\phi_{ds}(t)}{dt} \cdot i_{ds}(t) + \frac{d\phi_{qs}(t)}{dt} \cdot i_{qs}(t) \right) + \omega_s \cdot (\phi_{ds}(t) i_{qs} - \phi_{qs}(t) i_{ds})$$

Le premier terme représente les pertes par effet Joule, le deuxième la puissance électromagnétique stockée, le dernier terme constitue la puissance électrique convertie en puissance mécanique. Nous avons donc :

$$p_{méca}(t) = \omega_s \cdot (\phi_{ds}(t) \cdot i_{qs} - \phi_{qs}(t) \cdot i_{ds}) = c_{méca}(t) \cdot \omega_s$$

On en déduit l'expression du couple instantané :

$$c_{méca}(t) = (\phi_{ds}(t) \cdot i_{qs} - \phi_{qs}(t) \cdot i_{ds})$$

En exploitant les expressions des flux statoriques et en appelant p est le nombre de paires de pôles, il est possible d'établir d'autres expressions du couple toutes égales :

$$C_e = p \cdot (\phi_{ds} \cdot i_{qs} - \phi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (3.21a)$$

$$C_e = p \cdot (\phi_{qr} \cdot i_{dr} - \phi_{dr} \cdot i_{qr}) \quad (3.21b)$$

$$C_e = p \cdot M (i_{qs} \cdot i_{dr} - i_{ds} \cdot i_{qr}) \quad (3.21c)$$

$$C_e = p \cdot \frac{M}{L_r} (\phi_{dr} \cdot i_{qs} - \phi_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (3.21d)$$

C'est cette dernière expression que nous allons utiliser dans la commande vectorielle qui sera présentée par la suite.

La formule du couple électromagnétique donné par l'expression 3.21d est complexe et ne laisse pas présager que son contrôle soit chose aisée. Cette formule ne ressemble pas à celle du couple d'une machine à courant continu où le découplage entre le réglage du flux et celui du courant est naturel et rend la commande facile. La commande vectorielle, en découplant flux et courant, permet de simplifier la commande du couple en la rendant semblable à ce qui se passe pour une machine à courant continu. Cette simplification a cependant un prix : il est nécessaire de disposer d'une puissance de calcul suffisante afin de pouvoir effectuer les calculs nécessaires en temps réel.

Nous avons vu que le couple en régime transitoire (quelconque) s'exprime dans le repère d_q comme un produit croisé de courants ou de flux. Reprenons l'écriture de ce couple :

$$C_e = p \cdot \frac{M}{L_r} (\phi_{dr} \cdot i_{qs} - \phi_{qr} \cdot i_{ds})$$

Il est évident que pour donner au couple une forme exactement semblable à celui d'une machine à courant continu, il faut éliminer le deuxième produit ($\phi_{qr} \cdot i_{ds}$). Pour supprimer ce produit, il suffit d'orienter le repère d_q de manière à annuler la composante de flux en quadrature, c'est à dire de choisir convenablement l'angle de rotation de Park de sorte que le flux rotorique soit entièrement portée par l'axe direct d et donc d'avoir $\phi_{qr} = 0$. Ainsi ϕ_r sera uniquement égal à ϕ_{dr} (voir la figure III.5).

Le couple s'écrit alors :

$$C_e = p \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \phi_{dr} \cdot i_{qs}$$

On règle le flux ϕ_{dr} en agissant sur la composante i_{ds} du courant statorique, ensuite, le couple peut être fixé en agissant sur la composante i_{qs} .

C'est bien l'action sur i_{ds} qui permet de régler le flux. En effet, les équations $v_{dr} = 0$, en considérant le rotor en court-circuit, donnent :

$$\begin{cases} \phi_{dr} = L_s i_{dr} + M i_{ds} \\ 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} \end{cases}$$

On rappelle que le flux ϕ_{qr} est annulé dans cette commande. d'où l'on tire par substitution :

$$\phi_{dr} + \frac{L_r}{R_r} \cdot \frac{d\phi_{dr}}{dt} = M \cdot i_{ds}$$

Cette équation différentielle du premier ordre montre que lorsqu'on fixe le courant i_{ds} , on impose le flux rotorique ϕ_{dr} si le flux ϕ_{qr} est nul. La constante de temps est assez grande, de l'ordre de 100ms pour un moteur à rotor à cage.

Ainsi, une fois le régime permanent $\phi_{dr} = M \cdot i_{ds}$ atteint, les variations de flux sont lentes, cela donne une grande stabilité au comportement de la machine.

Une fois la régulation du couple maîtrisée, on peut ajouter une boucle de régulation externe pour contrôler la vitesse. Il s'agit alors d'une régulation en cascade et les boucles sont imbriquées l'une dans l'autre. Il est évident que pour augmenter la vitesse, il faut imposer un couple positif et que pour la diminuer il faut imposer un couple négatif. Il apparaît alors clairement que la sortie du régulateur de vitesse doit être la consigne de couple. Ce couple de référence doit à son tour être imposé par l'application des courants ; c'est le rôle des régulateurs de courants, voir la figure III.6.

Calcul de θ_s :

Pour pouvoir commander les composants, il est nécessaire de revenir dans le référentiel abc, donc de connaître la position de l'axe d. Cette position est repérée par l'angle θ_s qui vérifie : $\theta_s = \theta + \theta_r$.

L'angle θ est mesuré par un capteur de position et θ_r peut être obtenu par intégration de la pulsation des grandeurs rotoriques ω_r .

À partir des relations : $0 = R_r i_{qr} + \omega_r \phi_{dr}$

$$\phi_{qr} = 0 \Rightarrow L_r i_{qr} + M i_{qs} = 0$$

La pulsation des grandeurs rotoriques s'écrit :

$$\omega_r = -\frac{M \cdot R_r}{L_r} \cdot \frac{i_{qs}}{\phi_{dr}} = -\frac{M}{\tau_r} \cdot \frac{i_{qs}}{\phi_{dr}}$$

Elle peut donc être évalué à partir de la valeur estimée de i_{qs} et de celle, calculée, de ϕ_{dr} .

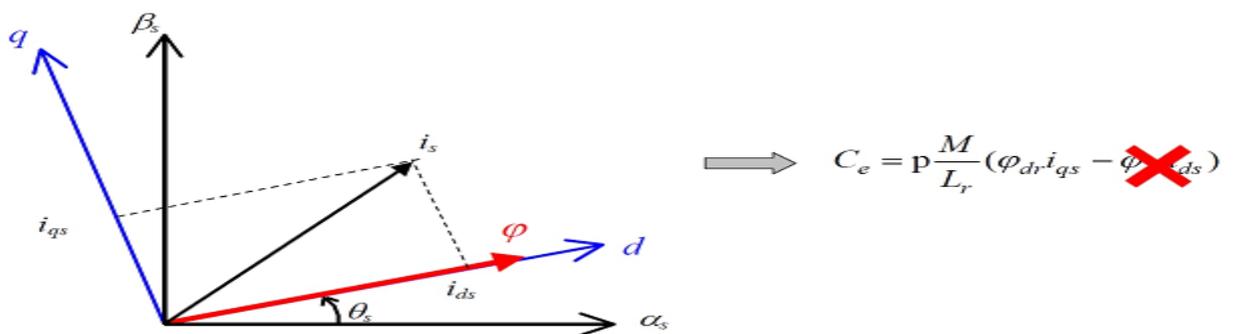


Figure III.5. Principe du contrôle vectoriel.

La machine de Park se comporte comme une machine à courant continu à excitation indépendante :

- le flux inducteur est φ_{dr} , puisqu'on fait en sorte que $\varphi_{qr} = 0$;
- le courant équivalent au courant d'induit est i_{qs} .

On a alors deux variables d'action comme dans le cas d'une machine à courant continu. Une stratégie consiste à laisser la composante i_{ds} constante, c'est à dire à fixer sa référence de manière à imposer un flux nominal dans la machine. Le régulateur du courant i_{ds} s'occupe alors de maintenir le courant i_{ds} constant et égal à la référence i_{ds}^* .

Le flux dans la machine étant constant, on peut imposer des variations de couple en agissant sur le courant i_{qs} .

Si l'on veut accélérer la machine, donc augmenter sa vitesse, on impose une référence courant i_{qs}^* positive. C'est le régulateur du courant i qui va imposer ce courant de référence à la machine.

On peut également automatiser le pilotage de cette référence de courant i_{qs}^* en la connectant à la sortie d'un régulateur de vitesse. C'est ce dernier qui pilotera le couple de référence (et donc i_{qs}^*) puisqu'il agira au mieux de manière à asservir la vitesse à une vitesse de consigne Ω^* .

La figure III.6 résume cette régulation, elle représente le schéma de contrôle vectoriel de la machine asynchrone avec une régulation de vitesse et la régulation des deux courants i_{ds} et i_{qs} . Ces deux courants sont régulés par deux boucles de courants dont les sorties sont les tensions de références v_{ds}^* et v_{qs}^* dans le repère dq.

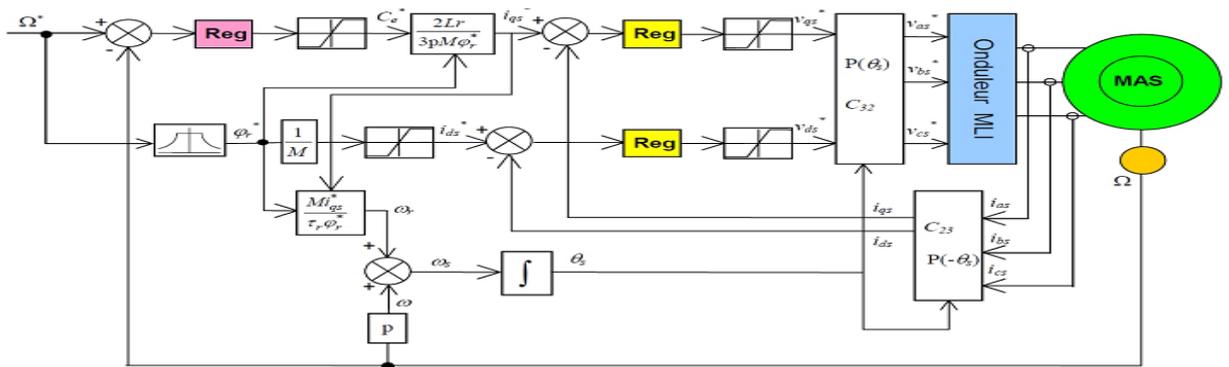


Figure III.6. Schéma de régulation de vitesse de machine asynchrone à flux rotorique orienté.

Le schéma de la figure III.6 comporte 3 régulateurs :

Le régulateur de vitesse : il agit sur le couple afin de réguler la vitesse, sa sortie est le couple de référence.

Le régulateur de courant i_{qs} : il agit sur la tension de référence v_{qs}^* pour ajuster le courant i_{qs}

. Si l'on regarde de plus près le schéma, on remarque qu'il y a un coefficient entre le couple de référence et le courant de référence i_{qs}^* . Ce coefficient tient compte de la valeur du flux (voir la formule du couple) mais également un facteur 2/3 qui dépend de la transformation triphasé – biphasé choisie. La présence de ce facteur 2/3 est due au choix de la transformation de Clarke dans ce schéma.

Le régulateur de courant i_{ds} : il agit sur la tension de référence v_{ds} . Réguler ce courant à une valeur constante, c'est garantir un flux rotorique constant car : $\varphi_r = \frac{M}{1 + p\tau_r} \cdot i_{ds}$ avec $\tau_r = L_r/R_r$ la constante de temps rotorique et p la variable de la transformé de Laplace. On voit alors qu'en régime permanent $\varphi_r = M \cdot i_{ds}$.

Par ailleurs, deux transformations sont importantes :

Une transformation inverse de Park : qui permet, à partir des tensions biphasées (v_{ds}^* , v_{qs}^*) dans le repère dq , de calculer les tensions triphasées v_{as}^* , v_{bs}^* , v_{cs}^* à imposer à la machine via l'onduleur à MLI.

Une transformation directe de Park: qui permet, à partir des trois courants de ligne de la machine, de calculer les courants biphasés (i_{ds} , i_{qs}) qu'il faut réguler dans le repère dq .

Ces deux transformations nécessitent le calcul de l'angle θ_s . Le bloc chargé d'effectuer ce calcul utilise la vitesse mesurée et la pulsation de glissement ω_r . Dans le cadre de la commande par orientation du flux rotorique, la pulsation de glissement se calcule par $\omega_r = i_{qs}/\tau_r i_{ds}$ ou en utilisant les références en lieu et place des mesures. Ainsi le calcul de l'angle des transformations directes et inverses peut se faire en sommant la pulsation de glissement avec la vitesse électrique, ce qui donne la pulsation statorique puis en intégrant cette dernière, on obtient θ_s .

$$\theta_s = \int \omega_s dt = \int \left(p\Omega + \frac{i_{qs}^*}{\tau_r i_{ds}^*} \right) dt$$

On obtient ainsi le schéma général à implanter sur une commande numérique (DSP ou micro-contrôleur).

À chaque période de fonctionnement de l'onduleur, la commande doit ouvrir ou fermer les interrupteurs de puissance (IGBT ou autre) de manière à créer dans la machine électrique un champ magnétique résultant dont le module et la direction sont optimaux pour répondre aux consignes de vitesse et de couple.

Le calculateur, qui va agir sur la commande des interrupteurs, se doit d'avoir quelques informations pour effectuer les calculs et particulièrement :

– la position du rotor .

– la vitesse du rotor.

Ces informations sont obtenues à l'aide d'un capteur de position ou de vitesse. Néanmoins, il est possible de reconstituer cette information avec plus ou moins de précision à l'aide d'informations électriques telles que la connaissance des courants. On parle alors de commande vectorielle sans capteur.

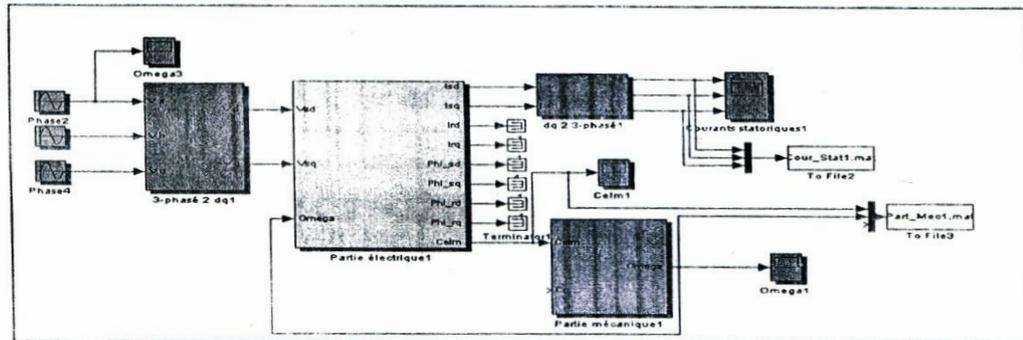


Figure III.7 :Bloc de simulation de la machine asynchrone

III.3.Modélisation de l'onduler de tension :

Il y a deux configurations possibles pour l'onduleur de tension figure(III.8) , avec ou sans neutre raccordé . L'onduleur à neutre raccordé consiste à connecter le neutre de la charge à un neutre créé au point milieu du bus continu de l'onduleur .Cette connexion autorise la circulation de courants homopolaires et permet de contrôler de façon découplée les tensions appliquées aux trois phases de la charge tout comme si elles représentaient trois systèmes monophasés .Cependant , l'onduleur à neutre isolé , est le montage le plus répandu .Pour la modélisation de l'onduleur , on considère un fonctionnement idéalisé :

- Interrupteurs parfaits : La commutation des interrupteurs est instantanée et sans pertes . (La chute de tension dans les interrupteurs et considérée nulle en conduction).
- Sources parfaites : La tension aux bornes du dipôle continu est constante et ne varie pas avec la puissance échangée.

L'objectif de la modélisation est de trouver une relation entre les grandeurs de commandes , les grandeurs électriques de la partie alternative et les grandeurs électriques de la partie continue de l'onduleur . Ainsi ,comme les grandeurs de commande agissent sur les interrupteurs commandables , on peut définir la fonction de commutation suivante pour définir l'état des Interrupteurs (k=a,b,c)[15].

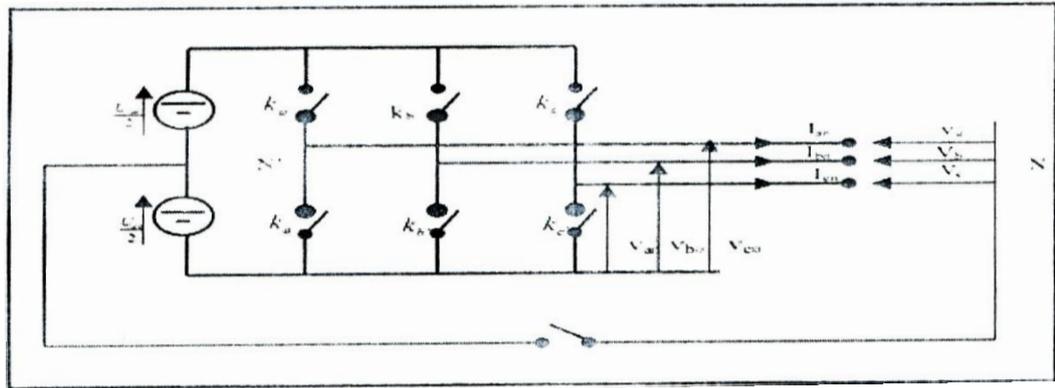


Figure III.8 : Schéma équivalent d'un onduleur de tension triphasé

$d_k = 1$ quand K_k est fermé, et $d_k = 0$ quand K_k est ouvert.

$d'_k = 0$ quand K'_k est fermé, et $d'_k = 1$ quand K'_k est ouvert.

La tension de branche de l'onduleur par rapport à la borne négative du bus continu sera :

$$\begin{bmatrix} Va0 \\ Vb0 \\ Vc0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_a \\ d_b \\ d_c \end{bmatrix} U_{dc} \quad (\text{III-33})$$

Et par rapport au point milieu du bus continu (N') :

$$\begin{bmatrix} VaN' \\ VbN' \\ VcN' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 2(d_a - 0.5) \\ 2(d_b - 0.5) \\ 2(d_c - 0.5) \end{bmatrix} \frac{U_{dc}}{2} \quad (\text{III-34})$$

Si le neutre n'est pas raccordée et la chargé équilibrée, la tension de phase sera :

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_a \\ d_b \\ d_c \end{bmatrix} \frac{U_{dc}}{3} \quad (\text{III-35})$$

Finalement si le neutre est raccordé au point milieu du bus continu , la tension de phase sera égale a la tension de branche par rapport a ce point milieu :

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} VaN' \\ VbN' \\ VcN' \end{bmatrix} \quad (\text{III-36})$$

➤ **MLI sinus –Triangle :**

La MLI sinus – Triangle est réalise par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) V_{ref} à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire V_p , les instants de commutation sont détermines par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante. L'osque e signal de comparaison et positif. la tension de sortie de l'onduleur est fixée à $\frac{U_c}{2}$. L'orsque il est négative, la tension est égale à $\frac{-U_c}{2}$.

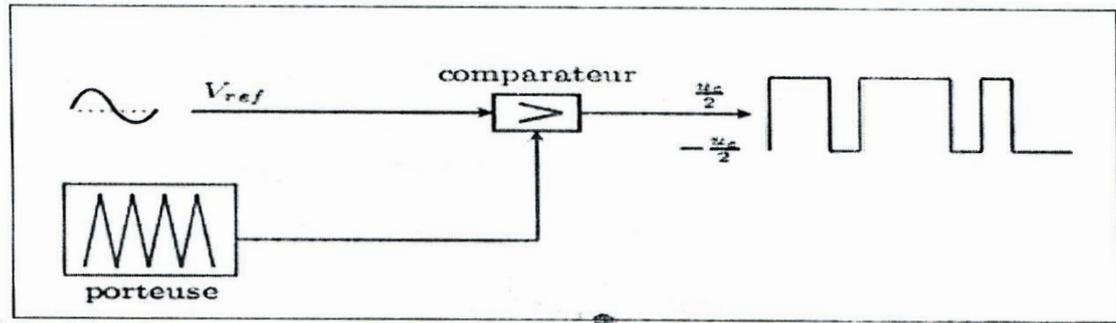


Figure III.9 : Structure de la MLI Sinus-Triangle. [56]

Deux paramètres caractérisent la modulation :

- L'indice de modulation $m = \frac{f_p}{f_{ref}}$.
- Le coefficient de réglage en tension $r = \frac{v_{mref}}{v_{mp}}$.

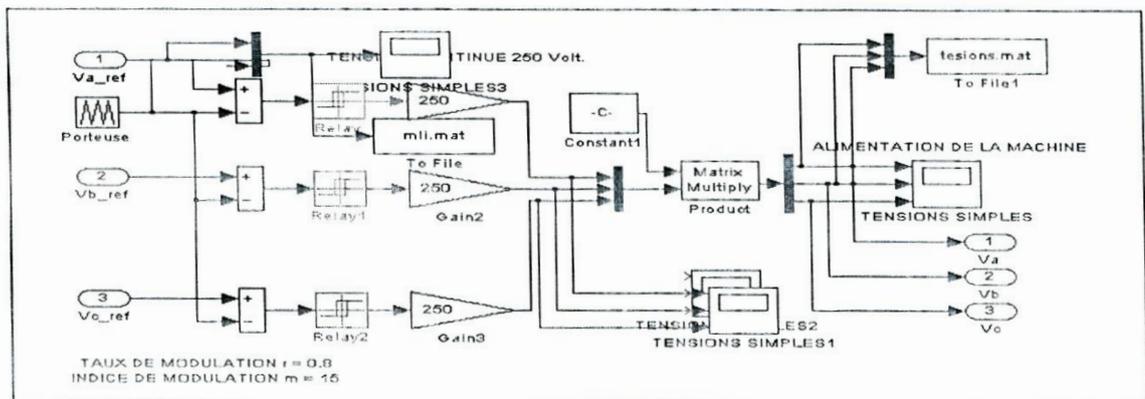


Figure III.10 : modèle de l'onduleur de tension triphasé avec la commande MLI

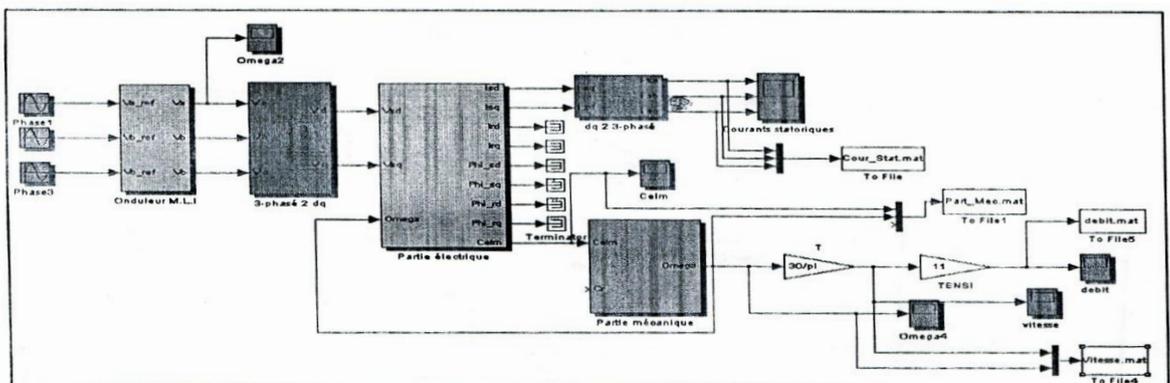


Figure III.11 : bloc de simulation de l'association moteur asynchrone-onduleur MLI

III.4. Modélisation de la pompe centrifuge :

Grâce aux progrès réalisés dans l'emploi de la force électromotrice, le développement des pompes centrifuges a été très rapide. Couplées aux moteurs électriques, elles constituent des groupes légers, peu encombrants, peu coûteux et d'un très bon rendement . Toutefois, ce pompes demandent à être utilisées rationnellement pour permettre un fonctionnement optimal de l'ensemble. [14]

L'adaptation électromécanique optimale de la pompe au moteur est donnée par l'intersection des courbes $c=f(N)$ du moteur et de la pompe.

Ainsi, connaissant les valeurs de vitesse, hauteur de charge et débit de référence, il est possible de déterminer celles du système à l'aide des formules empiriques suivantes : [15]

$$N_s = \frac{1000 \cdot \left(\frac{N}{60}\right) \cdot Q^{\frac{1}{2}}}{2a} \quad \text{(III-37)}$$

$$Q = K_{sp} \cdot N \cdot (D^3) \quad \text{(III-38)}$$

$$Q_2 = \frac{Q_1}{N_1} \cdot N_2 = K_1 \cdot N_2 \quad \text{(III-39)}$$

$$C_r = 0.3 + 3.9 \times 10^{-4} \cdot (\omega)^{1.8} \quad \text{(III-40)}$$

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \text{ en . (rad/s)}$$

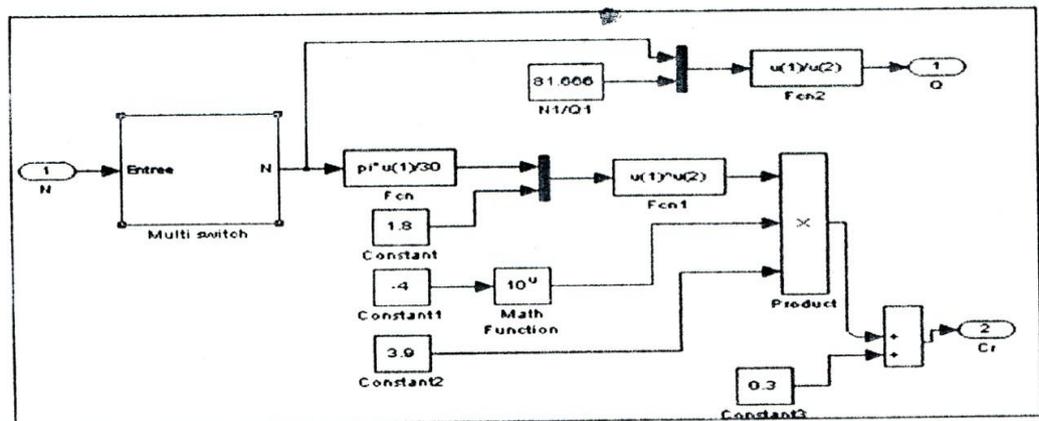


Figure III.12 : Modélisation de la pompe centrifuge.

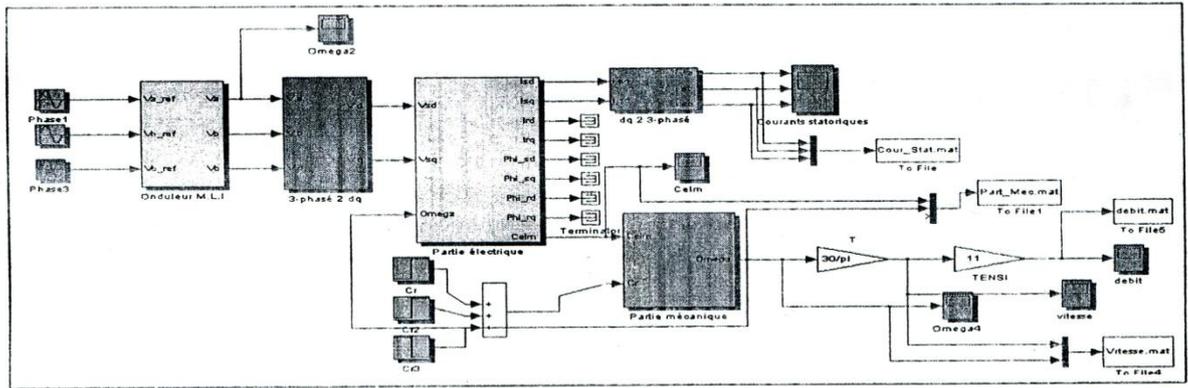


Figure III.13: bloc de simulation de système de pompage.

III.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons étudié la modélisation dynamique de la machine cette modélisation nous a permis d'établir un modèle mathématique dont la complexité a été réduite en se basant sur un certain nombre hypothèses simplificatrices. Et nous avons essayé de retrouver les résultats classiques de la machine asynchrone ainsi le modèle a été établi et de vérifié la simulation effectuée par le logiciel [MATLAB/Simulink]. Le modèle de la machine asynchrone simulée a été établi en passant du système réel triphasé vers un système biphasé de [PARK]. Les résultats obtenus suite à cette simulation montrent bien la validité du modèle étudié nous avons modélisé l'onduleur de tension qui nous a permis d'obtenir un entraînement à vitesse variable. Ces derniers entraînent le bon fonctionnement de la motopompe.

Chapitre IV

Calcul sélectif des modes de réglage d'une pompe centrifuge

IV.1. Introduction

Le débit et la pression générée par une pompe centrifuge sont intimement liés. Ils décrivent une courbe qui est caractéristique de la pompe. La variation de ces paramètres (Q et H) permet d'adapter une pompe standard aux besoins particuliers d'une application. Ce moyen est utilisé au moment de la conception de l'installation ou pour une modification ultérieure. Le point de fonctionnement se déplacera sur la courbe caractéristique avec la variation des paramètres. Ces variations doivent être maîtrisées par un opérateur ou un système de régulation, pour assurer le fonctionnement correcte et conserver sécurité de la pompe.

Dans ce chapitre le travail est divisé en deux parties. La première partie est consacré aux calculs numérique qui consiste à la sélection de deux modes de réglage des paramètres d'une pompe centrifuge, et la deuxième partie consiste à la modélisation et la commande du groupe moteur-pompe selon les résultats obtenus du partie calcul.

IV .2 Choix de la pompe centrifuge

Le choix d'une pompe centrifuge ne s'improvise pas. Il faudra considérer un certain nombre de facteurs de calcul pour pouvoir intégrer les éléments de données nécessaires et opérer un dimensionnement correct.

⇒ Données de la pompe

La pompe a un clapet anti-retour et une vanne à la conduite d'aspiration, un clapet antiretour, une vanne et 3 coudes à la conduite de refoulement.

Le débit : $Q=121 \text{ m}^3/\text{h}$

La hauteur géométrique à l'aspiration : $H_a= 240\text{m}$

La hauteur géométrique au refoulement : $H_f=360.5\text{m}$

IV .2.1 Calcule de la hauteur manométrique

$H_m= H_g+P_c$ avec H_g est la hauteur géométrique et P_c sont les pertes de charge.

$H_g=hf-h_a$

⇒ Pertes à l'aspiration des pertes ;

Tuyau: $P_{c_{ta}}= 1.3\text{kW}$

Clapet anti-retour : $P_{c_{ca}}=3.69\text{kW}$

Vanne : $P_{c_{va}}= 3.23\text{kW}$

⇒ Pertes au refoulement

Tuyau: $P_{c_{tf}}=2.8\text{kW}$

Clapet anti-retour : $P_{c_{cf}}=5.2\text{kw}$

Vanne : $P_{c_{vf}}= 4.25\text{kw}$

Trois coudes : $P_{c_{cd}}=6.3\text{kw}$

Les pertes de charge totale : $P_c = P_{c_{ta}}+ P_{c_{ca}}+ P_{c_{va}}+ P_{c_{tf}}+ P_{c_{cf}}+ P_{c_{vf}}+ P_{c_{cd}}=26.77 \text{ kw}$

Ce résultat concerne les conduites neuves, pour les vieilles conduites il faut ajouter un pourcentage de 1.33 de vieillissement et d'entartrage.

$P_c= 1.33+26.77 =28.1 \text{ kw}$

Alors : $H_m=120.5 \text{ m} + 28.1 \text{ m} = 148.6\text{m}$

Pour le caractéristiques de débit $Q=121\text{m}^3/\text{h}$ et de hauteur manométrique $H_m= 148.6 \text{ m}$, on peut choisir une pompe : Ensival Mouret [16]

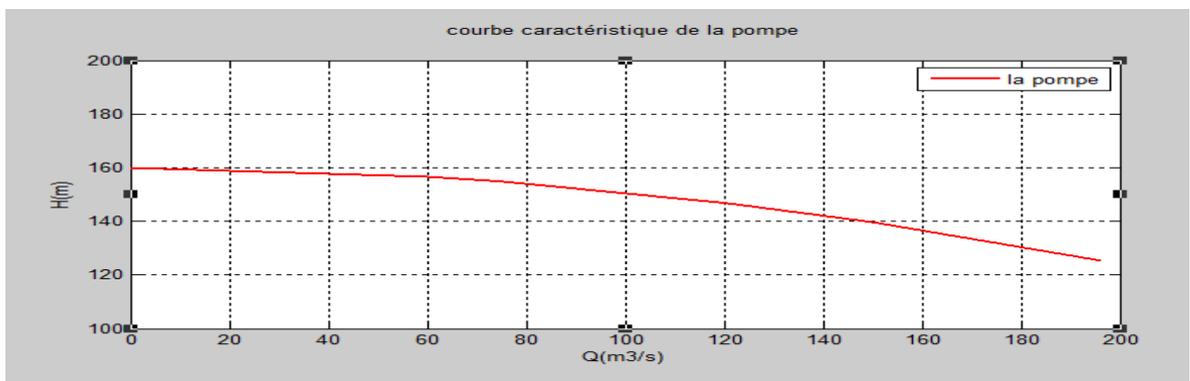


Figure IV-1 : courbe caractéristique de la pompe

⇒ caractéristique de la pompe [16]

Nature de fluide (liquide) : eau

la masse volumique du fluide : $\rho=10^3\text{kg/m}^3$

Pression d'aspiration : $P_a = 0.89\text{bar}$

Pression de refoulement : $P_r=15.8\text{bar}$

$NPSH_{requis} = 3.3\text{m}$

$NPSH_{disponible} =7.43\text{m}$

Nombre d'étage =1

La vitesse de rotation : $n = 2975 \text{ tr/min}$

Puissance absorbé : $P_{abs}= 42.3\text{kw}$

Le Rendement : $\eta=87\%$

IV.2.2 Détermination du point de fonctionnement

L'intersection de la courbe du réseau et de la courbe caractéristique de la pompe définit le point de fonctionnement et donc le débit nominal.

⇒ **Caractéristique du circuit (réseau)**

Chapitre IV Calcul sélectif des modes de réglage d'une pompe centrifuge

La courbe du réseau, représente l'énergie par unité de poids, ou encore l'énergie par unité de volume à fournir au fluide pour le faire circuler avec un débit. Elle tient compte de l'élévation éventuelle du fluide, et les pertes de charge dans le circuit de refoulement.

L'équation de la caractéristique de la conduite est :

$$\begin{cases} H_m = H_g + P_c \\ P_c = K Q^2 \end{cases} \Rightarrow H_m = H_g + K Q^2 \quad (1)$$

K en (s^2/m^5), est une constante qui caractérise une conduite donnée, peut être calculer selon les dimensions géométrique de la conduite, et le régime d'écoulement.

$$H_m = 148.6 \text{ m}$$

$$H_g = 120.5 \text{ m}$$

$$Q = 121 \text{ m}^3/\text{h} = 0.0336 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$\text{De (1) : } K = \frac{H_m - H_g}{Q^2} = 248.9 \times 10^2 \text{ (s}^2/\text{m}^5\text{)},$$

Q(m ³ /s)	Q ² (m ³ /s) ²	K Q ² (m)	H _m (m)	Q(m ³ /h)
0	0	0	120.5	0
0.016	2.56 × 10 ⁻⁴	6.372	126.87	60
0.021	4.41 × 10 ⁻⁴	10.97	131.5	75.7
0.0336	1.12 × 10 ⁻³	28.1	148.6	121
0.042	1.764 × 10 ⁻³	43.9	164.4	150
0.054	2.916 × 10 ⁻³	72.57	193.07	196.3

Tableau. IV-1: Q1=f(H1)

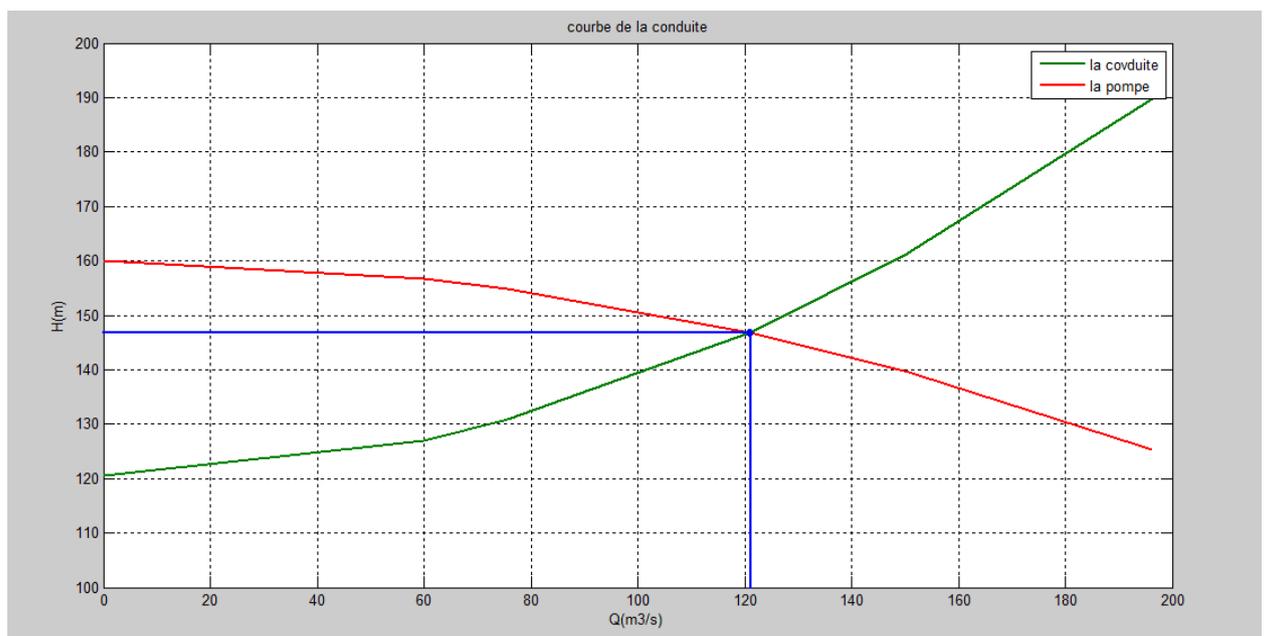


Figure IV-2: courbe caractéristique de la conduite

Le point de fonctionnement de la pompe est le point qui a les coordonnées suivantes :

$$Q = 121 \text{ m}^3/\text{h}, H = 148.6 \text{ m}$$

IV .3. Choix du moteur

Lors du choix du moteur, c'est la puissance absorbée par la pompe qui détermine la puissance délivrée par le moteur et donc aussi la puissance absorbée au réseau. Il faut donc prendre garde à ce que le moteur ait une puissance suffisante pour satisfaire toutes les situations de fonctionnement de l'installation.

⇒ puissance fournie du moteur : p_{um}

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

$$\eta_{acc} = 0,9 \div 0,98 \text{ (accouplement)} \quad \Longrightarrow \quad \eta_{acc} = 0.98$$

$$\eta_{acc} = \frac{P_{abs}}{P_{um}} \quad \Longrightarrow \quad P_{um} = \frac{P_{abs}}{\eta_{acc}} = \frac{42.33}{0.98} = 43.16 \text{ kw}$$

On choisit un moteur de puissance absorber: $p_a > 43.16 \text{ kw}$

Le moteur normalisé choisi est de type :Data SHEET

- Caractéristique du moteur :[16]

La vitesse de rotation: $N = 1297 \text{ tr/min}$

le nombre de pôles : $P= 2$

Le rendement: $\eta_m = 95 \%$

La puissance: $P_a = 51.3 \text{ kw}$

$\cos \varphi = 0.88$

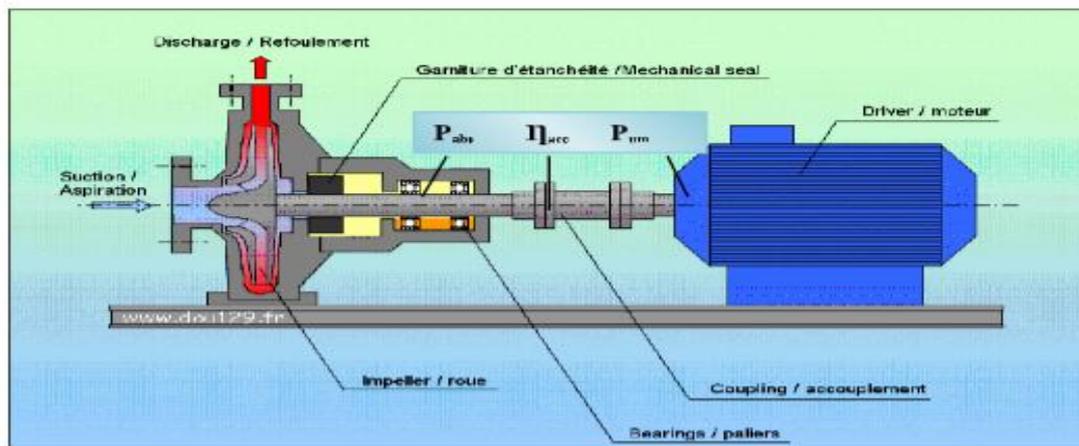


Figure IV-3 : Accouplement du groupe moteur – pompe

IV .3. 1 Billon des puissances :

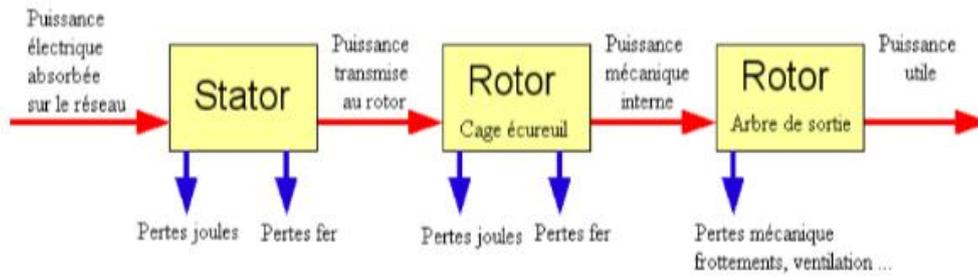


Figure IV-4 : bilan des puissances d'un moteur asynchrone

On néglige les pertes à vide (les pertes fer et pertes mécaniques).

⇒ Vitesse de synchronisme :

$$N_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \times 50}{2} = 1500 \text{ tr/min}$$

⇒ Glissement :

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} = \frac{1500 - 1297}{1500} = 0.13$$

⇒ Pulsation de synchronisme :

$$\Omega_s = \frac{2\pi \cdot N_s}{60} = \frac{2 \times 3.14 \times 1500}{60} = 157 \text{ rd/s}$$

⇒ Pulsation du rotor :

$$\Omega = \frac{2\pi \cdot N}{60} = \frac{2 \times 3.14 \times 1297}{60} = 135.75 \text{ rd/s}$$

⇒ Puissance électromagnétique (puissance transmise au rotor) :

$$\begin{cases} P_{em} = C_{em} \cdot \Omega_s \\ P_{um} = C_u \cdot \Omega \\ P_{um} = C_{em} \cdot \Omega_s \cdot [1-g] \\ \Omega = \Omega_s \cdot (1-g) \end{cases} \Rightarrow P_{um} = C_{em} \cdot \Omega = C_u \cdot \Omega \quad P_{em} = C_u \cdot \Omega_s$$

$$C_u = \frac{P_{um}}{\Omega} = \frac{48.73 \times 10^3}{135.75} = 359 \text{ Nm}$$

$$P_{em} = 979.74 \times 104.6 = 102480.80 = 102.48 \text{ kw}$$

⇒ Pertes joule statorique :

$$P_a = P_{em} + P_{jr} \Rightarrow P_{js} = P_a - P_{em} = 144 - 102.48 = 41.52 \text{ kw}$$

⇒ Pertes joule rétorqué :

$$P_{jr} = P_{em} \cdot g = 102.48 \times 0.29 = 29.71 \text{ kw}$$

IV .4. Réglage du débit

On va évaluer les caractéristiques de fonctionnement de la pompe selon les résultats obtenus du calcul sélectif de deux méthodes de réglage du débit.

IV .4.1. Réglage du débit par vanne de réglage

Pour régler le débit d'une pompe centrifuge, on utilise souvent une vanne de réglage située au voisinage du refoulement de la pompe.

Le tableau suivant résume les résultats obtenus des tests de la pompe pour une vitesse donnée.

Q (m ³ /h)	H _m (m)	N (tr/mn)	F(Hz)	η %	P(kw)	C (w/m ³)
75.7	156.8	1297	50	59	34.6	123.7
121	148.6	1297	50	87	42.33	118.2
150	142	1297	50	93	68.2	112.9

Tableau. IV-2 : Les données obtenues par le test de la pompe

Avec C est la consommation de la pompe : $C = \frac{P}{Q}$

La puissance absorbée de la pompe $P = \frac{\rho \cdot H \cdot Q}{\eta \cdot 367}$

Ou P en kW

Q en m³/h

H est la Hm en m

⇒ **caractéristiques de la conduite pour Q=150 m³/h, H=142 m**

$$H_m = H_g + P_c = H_g + KQ^2$$

$$K = \frac{H_{mt} - H_g}{Q^2} = \frac{142 - 120.5}{1.764 \times 10^{-3}} = 487.53 \times 10^2 (s^2/m^3)$$

Q (m ³ /s)	Q ² (m ³ /s) ²	KQ ² (m)	Hmt(m)
0	0	0	120.5
0.016	2.56 × 10 ⁻⁴	12.48	133
0.021	4.41 × 10 ⁻⁴	21.5	142
0.0336	1.12 × 10 ⁻³	55.04	175.5
0.042	1.764 × 10 ⁻³	86	206.5
0.054	2.916 × 10 ⁻³	142.16	262.6

Tableau. IV-3: Q1 = f(H1)

▪ **caractéristiques de la conduite pour Q=75.7 m³/h, H=156 m.**

$$K = 805 \times 10^2 (s^2/m^3)$$

Q (m ³ /s)	Q ² (m ³ /s) ²	KQ ² (m)	Hmt(m)
0	0	0	120.5
0.016	2.56×10 ⁻⁴	20.6	141.1
0.021	4.41×10 ⁻⁴	37.48	158
0.0336	1.12×10 ⁻³	96	216.5
0.042	1.764×10 ⁻³	150	270
0.054	2.916×10 ⁻³	247.8	368

Tableau. IV-4 : Q2 = f(H2)

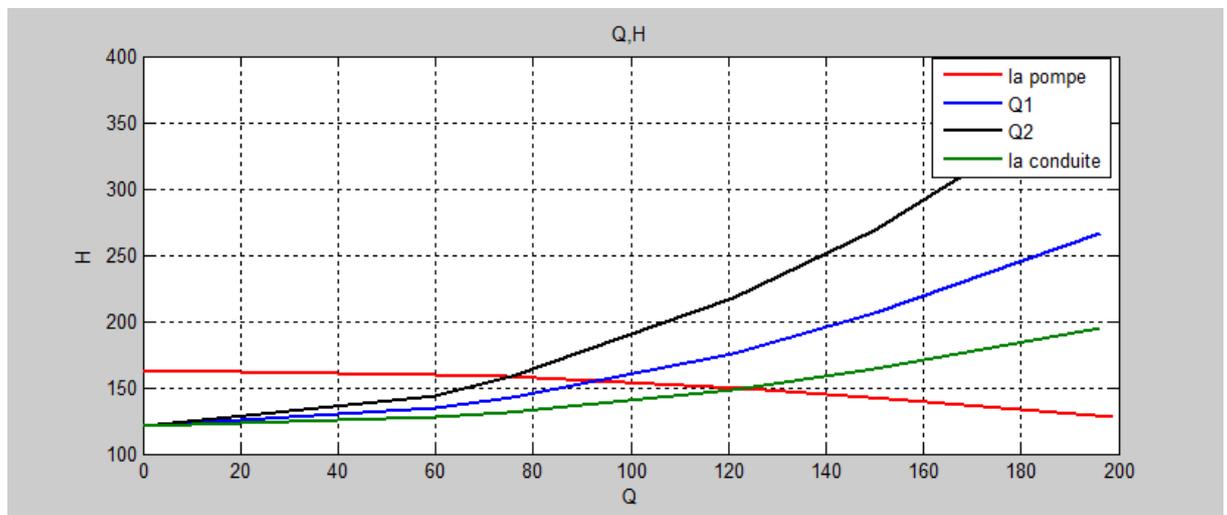


Figure IV-5 : courbes caractéristiques de la conduite (Cas du vannage à vitesse fixe)

Les figures ci-haut montrent que la variation du débit modifie l'allure de la courbe du réseau, le point de fonctionnement se déplace également. La fermeture de la vanne conduit à une diminution de débit de la pompe et une augmentation de la pression. Donc les pertes augmentent, et le rendement se dégrade.

IV .4.2 Réglage du débit par variation de vitesse du moteur d'entraînement

Une autre méthode de réglage utilisable est de faire varier la vitesse de rotation de la roue de la pompe à l'aide d'un variateur de vitesse du moteur électrique. Le choix du variateur de vitesse se fait selon la puissance du moteur.

Suivant les caractéristiques du moteur choisi (Pa=140kw), le variateur approprié est de type : MLI

Caractéristique du variateur

- Courant d'entrée : 90A
- Courant de sortie continu : 85A

- Degré de protection : IP 55

Calcul de la vitesse de rotation du moteur d'entraînement

Le débit varie entre 350.3 et 100 (m³/h).

La pulsation du courant rotorique: ω_r , et l'écart $\Omega_s - \Omega = \frac{\omega_r}{p}$ sont constant.

- Pour $f_1 = 50$ (Hz).

$$Q_n = 121 \text{ (m}^3\text{/h)} \quad N_n = 1297 \text{ tr/mn}$$

$$P_{jr} = 0.53 \text{ kw} \quad P_{js} = 0.62 \text{ kw}$$

$$\omega_s = 2 \cdot \Pi \cdot f = 2 \cdot 3.14 \cdot 50 = 314 \text{ rd/s.}$$

$$g = \frac{\omega_r}{\omega_s} = 0.13 \quad \Longrightarrow \quad \omega_r = g \cdot \omega_s = 0.13 \times 314 = 40.82 \text{ rd/s.}$$

- Pour $f_2 = 47,5$ (Hz).

$$N_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \times 47.5}{2} = 1425 \text{ tr/mn}$$

$$\omega_s = 2 \cdot \Pi \cdot f = 2 \times 3.14 \times 47.5 = 298.3 \text{ rd/s}$$

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} = \frac{298.3}{2} = 149.15 \text{ rd/s}$$

$$g = \frac{\omega_r}{\omega_s} = \frac{40.82}{298.3} = 0.13$$

$$g = \frac{N_s - N}{N_s} \quad \Longrightarrow \quad N = N_s (1 - g) = 1425 \times (1 - 0.13) = 1239.75 \text{ tr/mn}$$

- Pour $f_3 = 52.5$ (Hz)

$$N_s = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \times 52.5}{2} = 1575 \text{ tr/mn}$$

$$\omega_s = 2 \cdot \Pi \cdot f = 2 \times 3.14 \times 52.5 = 329.7 \text{ rd/s}$$

$$\Omega_s = \frac{\omega_s}{p} = \frac{329.7}{3} = 109.8 \text{ rd/s}$$

$$N = N_s (1 - g) = 1575 \times (1 - 0.12) = 1380 \text{ tr/mn}$$

- la puissance absorbée de la pompe pour $N=1239.75$

$$P_1 = \frac{Q_1 \cdot H_1 \cdot \rho}{\eta \cdot 367} = \frac{75.7 \times 156.8 \times 1}{0.3057 \times 367} = 138.5 \text{ kw}$$

- la puissance absorbée de la pompe pour $N=1380$ tr/mn

$$P_2 = \frac{Q_2 \cdot H_2 \cdot \rho}{\eta \cdot 367} = \frac{150 \times 142 \times 1}{0.5504 \times 367} = 114.06 \text{ kw}$$

- **la consommation de la pompe pour N=1239.75 tr/mn**

$$C_1 = \frac{P_1}{Q_1} = \frac{138.5 \times 10^3}{100} = 1381.5 \text{ (w/m}^3 \text{)}.$$

- **la consommation de la pompe pour N=1380 tr/mn**

$$C_2 = \frac{P_2}{Q_2} = \frac{114.06 \times 10^3}{180} = 633.66 \text{ (w/m}^3 \text{)}.$$

- **Calcul des paramètres de la pompe**

On peut calculer les paramètres de la pompe à l'aide la loi de similitude

- **Calcul de NPSHrequis :**

Pour N = 1297 NPSHr₀ = 3 m

Pour N = 1239.75 NPSHr₁ = 3[1239.75/1297]^{1.6} = 5.39 m

Pour N = 1380 NPSHr₂ = 3[1380/1297]² = 10.18 m

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

N = 1239.75 tr/min

N = 1380 tr/min

$$\begin{matrix} Q_1 = Q_0[N_1/N_0] \\ H_1 = H_0[N_1/N_0]^2 \end{matrix} \quad \begin{matrix} \Rightarrow \\ \Rightarrow \end{matrix} \quad \begin{matrix} Q_1 = Q_0[1239.75/1297] \\ H_1 = H_0 [1239.75/1297]^2 \end{matrix}$$

Q ₁	0	57	72.35	115.6	143.37	187.6
H ₁	152.93	151.02	149.8	142.04	135.7	118.8

- **N = 1380**

$$\begin{matrix} Q_2 = Q_1[N_2/N_1] \\ H_2 = H_1[N_2/N_1]^2 \end{matrix} \quad \begin{matrix} \Rightarrow \\ \Rightarrow \end{matrix} \quad \begin{matrix} Q_2 = Q_1[1380/1297] \\ H_2 = H_1[1380/1297]^2 \end{matrix}$$

Q ₂	0	60.6	76	122	152.5	199.6
H ₂	162.7	160	156.19	151.12	144.3	126.40

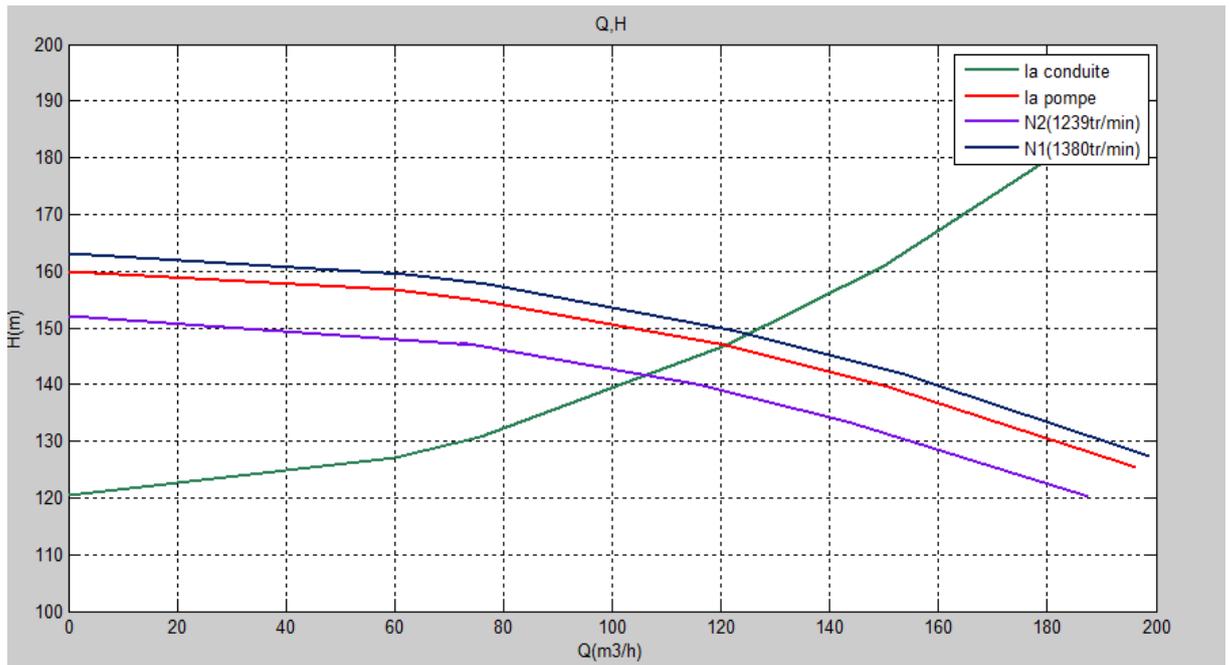


Figure IV-6 : courbes caractéristiques de la pompe (cas de variation de vitesse).

La figure montre que la pompe fournit plus de pression et plus de débit lorsque sa vitesse de rotation augmente. Le point de fonctionnement de la pompe se déplace vers le haut avec l'élévation de la pression et de débit ce qui fait l'élévation du rendement.

IV.2. Simulation :

IV.2.1.Introduction :

. Dans notre étude pour la partie de simulation on a opté l'utilisation du logiciel MATLAB SIMILINK pour réaliser la simulation de système de problématique :

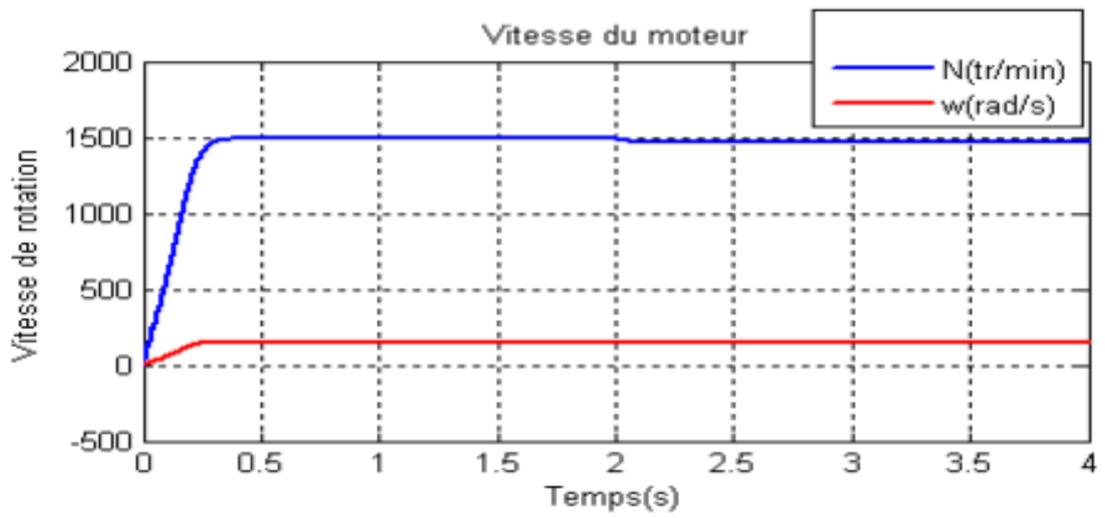
Installation variateur - moteur-pompe.

IV.2.2.Résultat de simulation pour le cas de vanne (sans variation de vitesse)

:

Dans la programmation, pour les paramètres du moteur asynchrone on utilise les données obtenues du partie calcul.

a-



b-

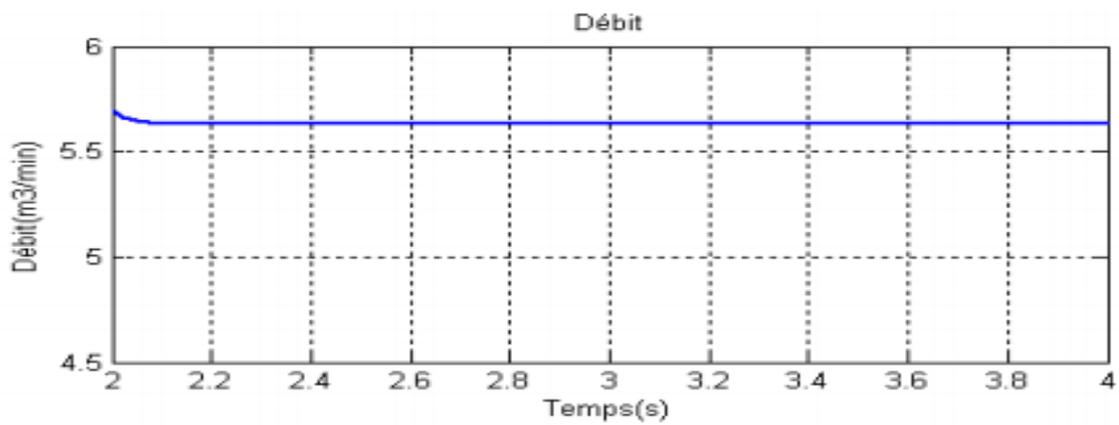
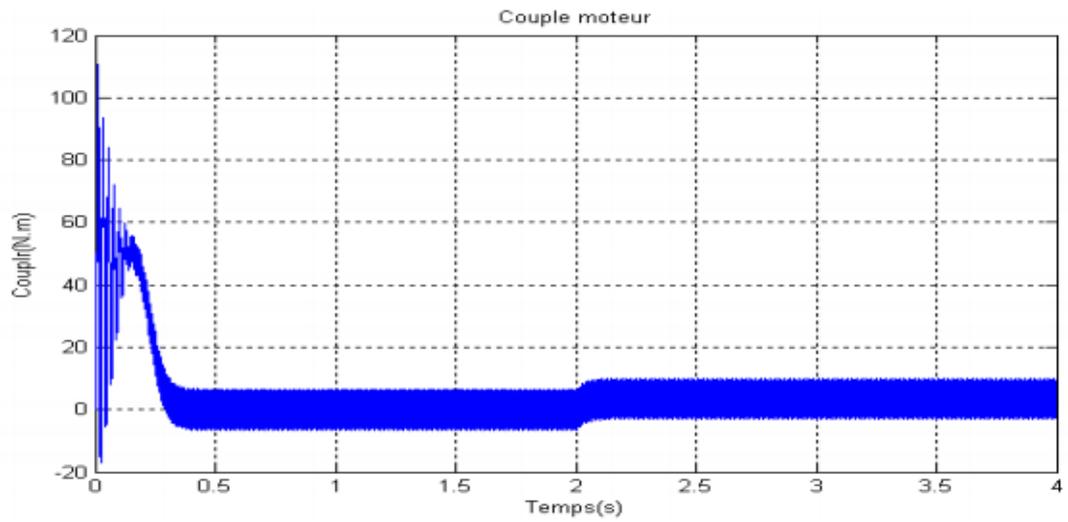


Figure. IV-7(a,b) : vitesse de rotation et vitesse angulaire du moteur dans un fonctionnement à vide et sous charge (charge appliquée à l'instant $t = 2s$)

a-



b-

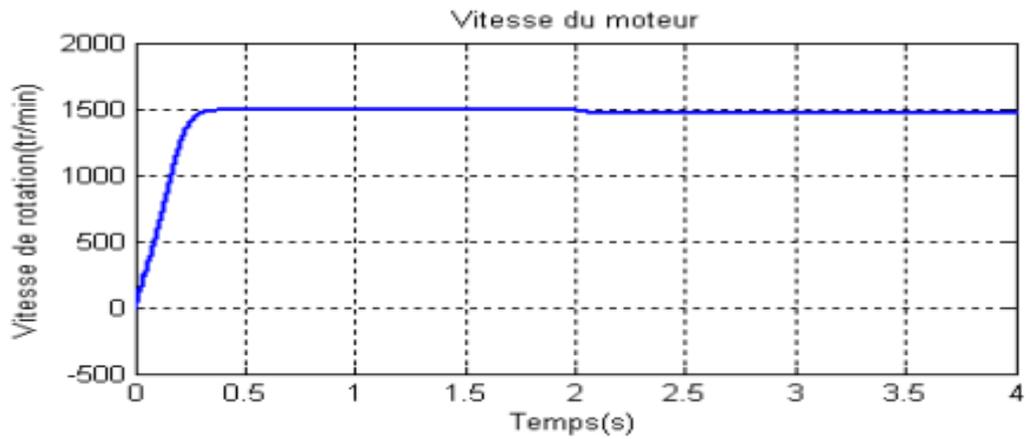


Figure. IV-8 (a,b): Couple moteur et vitesse angulaire du moteur dans un fonctionnement à vide et sous charge (charge appliquée à l'instant $t = 2s$).

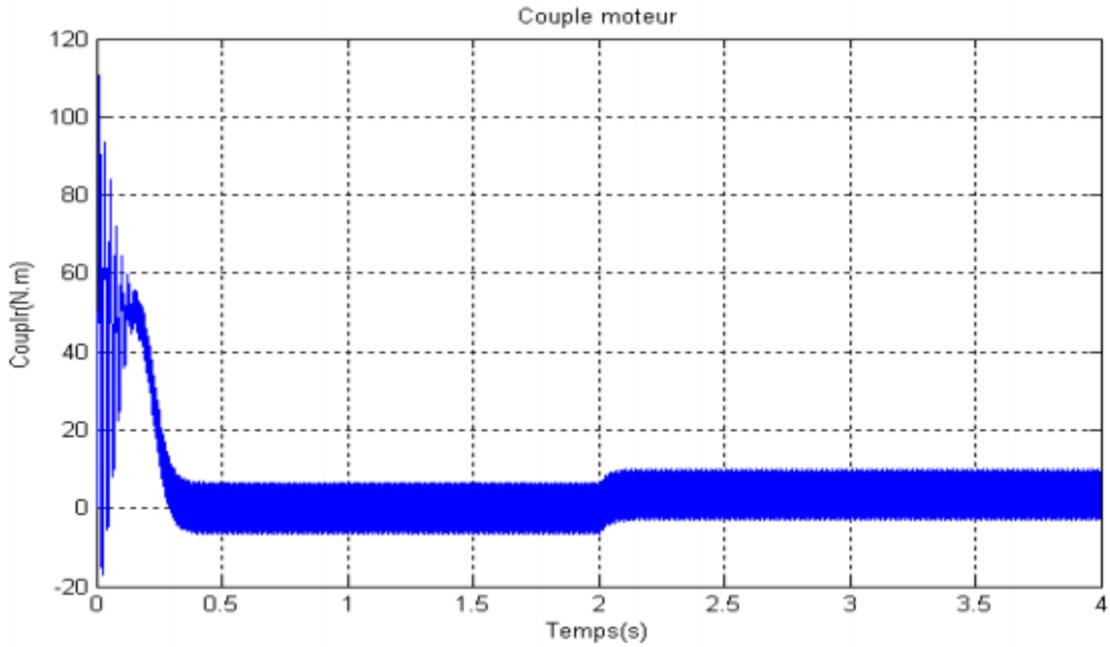


Figure. IV-9 : Couple moteur dans le fonctionnement à vide et sous charge (Charge appliquée à l'instant $t = 2s$).

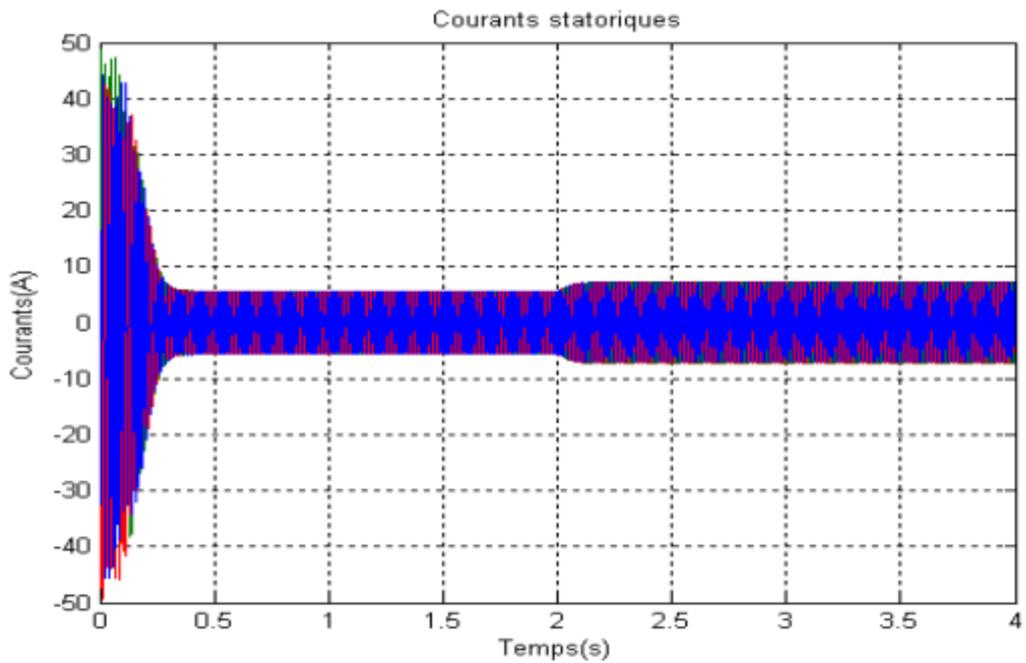
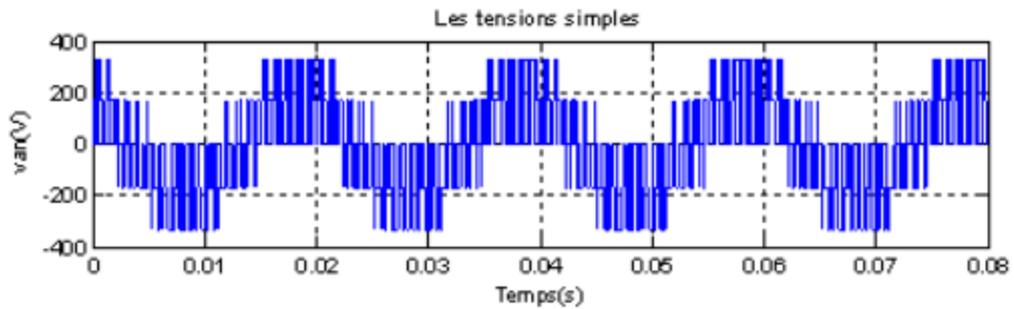
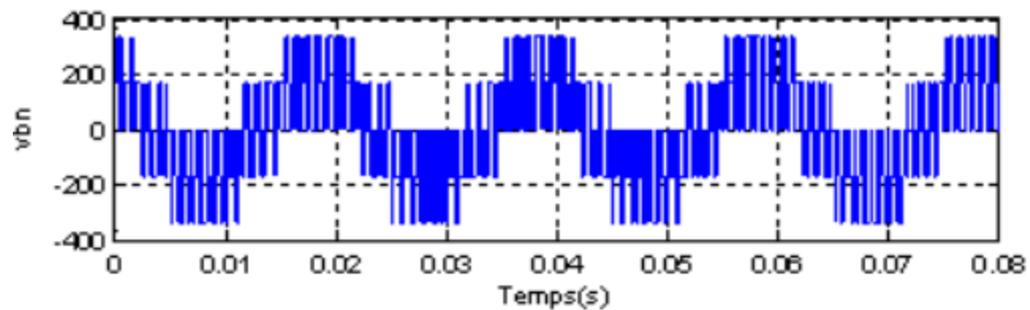


Figure. IV10 : Courants statoriques fonctionnement à vide et sous charge (charge appliquée à l'instant $t = 2s$)

a-



b-



c-

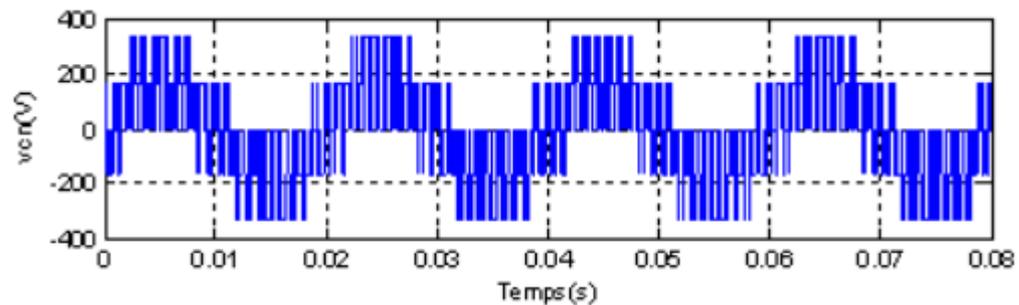


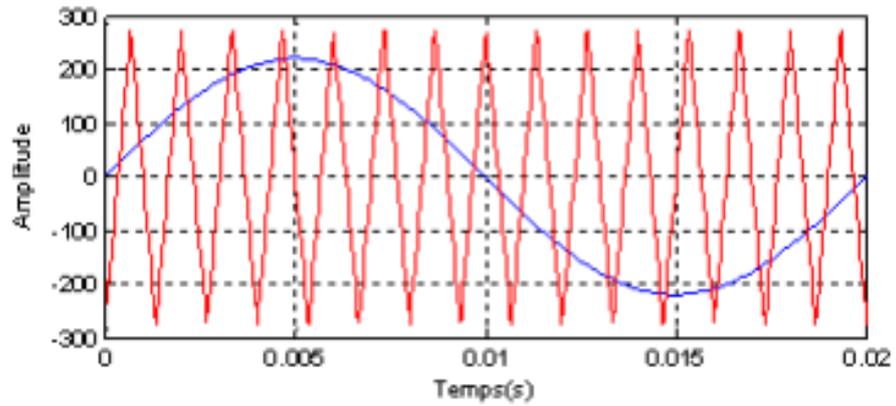
Figure. IV-11(a, b, c) : Tension simple des 3 phases (fonctionnement sous charge)

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 $(121\text{m}^3/\text{h})$ pour une vitesse de $(1297\text{tr}/\text{min})$. On peut voir également à partir de ces allures et celle de la figure (IV-8) 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-9), (IV-10), 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-11). La figure (IV-12) représente l'allure des tensions simples des trois phases du moteur fonctionnant en charge.

IV.2.3.Résultat de simulation pour le cas de variation de vitesse :

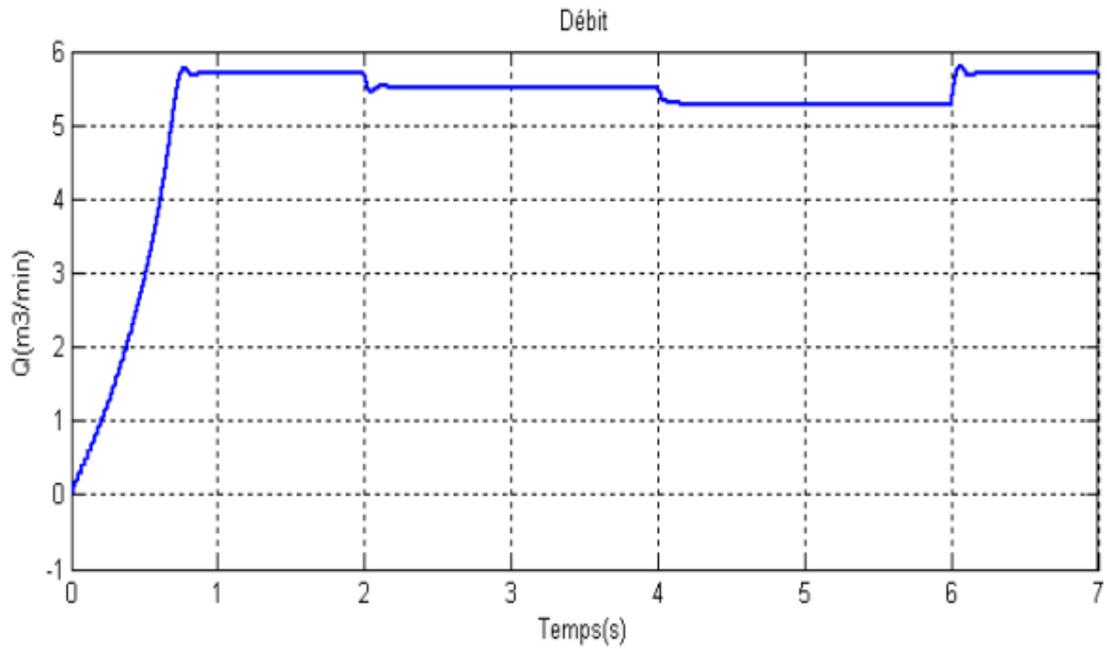
Après l'application de l'entraînement à vitesse variable on a obtenu les résultats de simulation



suivante.

Figure. IV-12 : Représentation de la porteuse et la référence et détermination des instants De commutation de la commande MAI pour notre système

a-



b-

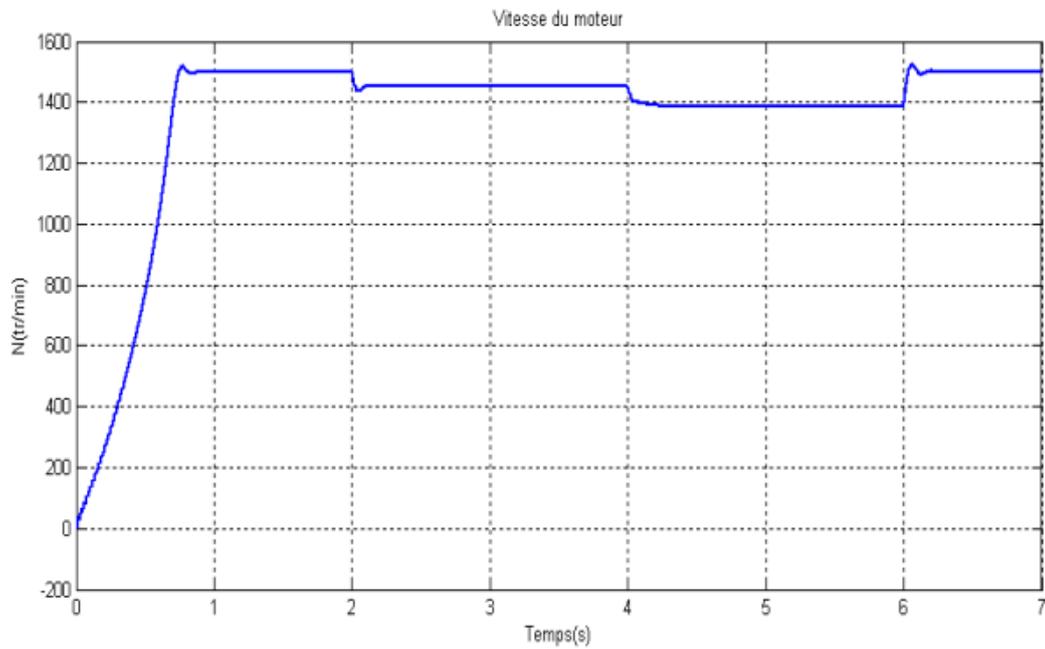


Figure. IV-13 (a,b): Variation de vitesses de la pompe correspond à la variation de son débit.

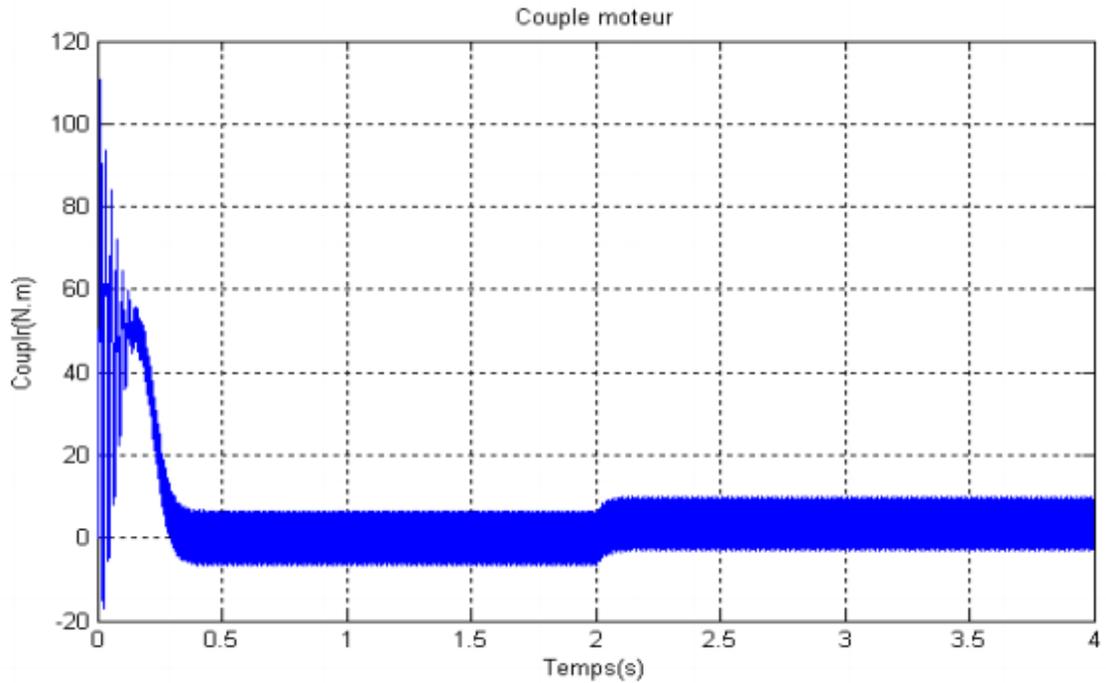


Figure. IV-14 : Couple du moteur qui fonctionne sous charge avec variation de vitesse.

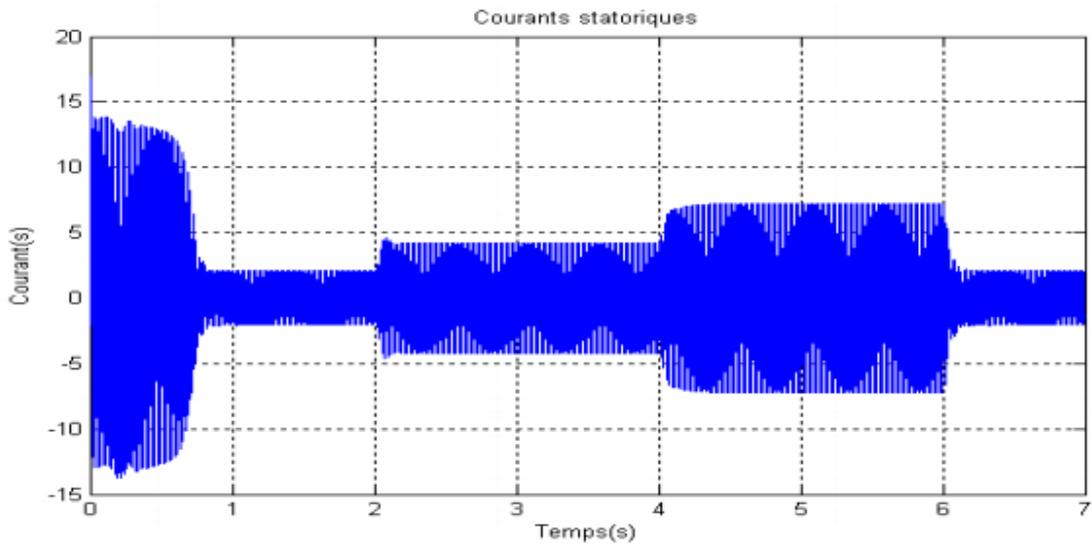


Figure. IV-15 : Courant statorique du moteur qui fonctionne sous charge avec variation de vitesse.

Discussion :

La figure (IV-14) 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-15) Le courant statorique résulte de cette variation de vitesse est illustré dans figure (IV-16) qui proportionnel au couple moteur évoluant avec la variation du débit de la pompe

IV. 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.

Les résultats obtenus de calculs montre que pour le même travail, le système absorbe plus d'énergie avec l'élévation de pression. Par contre avec le système à vitesse variable, le rendement augmente avec l'augmentation de la vitesse. Alors pour un système plus performant on peut utiliser un système à vitesse variable pour modifier les paramètres d'une pompe centrifuge.

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

Conclusion générale

Les pompes centrifuges sont largement utilisées en raison de leur fonctionnement relativement simple et abordable. Les débits et pressions des fluides sont des paramètres essentiels d'une pompe centrifuge, ils sont souvent étroitement liés. Le réglage du débit ou de pression se fait donc le plus souvent en jouant sur l'ouverture d'une vanne sur le circuit de refoulement, ou éventuellement par la vitesse de rotation de la pompe (fréquence du moteur électrique).

L'objectif principal de ce travail était d'étudier l'effet des vibrations des paramètres essentiels de la pompe sur le comportement de la machine. Pour atteindre ce but deux méthodes réglage des paramètres ont été envisagées. Un modèle mathématique pour simuler le comportement dynamique du système étudié a été mis au point.

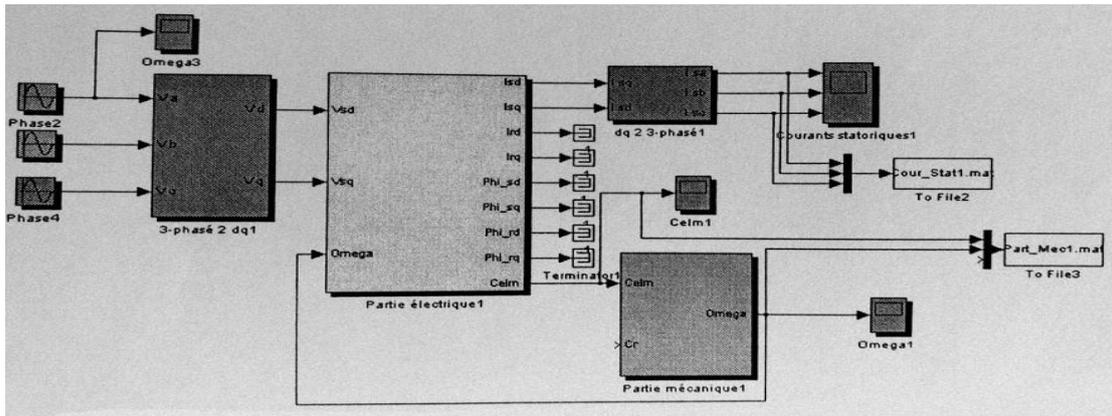
Les résultats obtenus avec les calculs et la simulation, ont montré que le réglage du débit des pompes en fonction de la variation de la vitesse est la meilleure méthode par rapport la méthode de vanne pour un régime fonctionnement rationnel en terme de coût et de sécurité.

Enfin, le système de pompe à eau a été étudié et analysé pour justifier notre proposition. Les résultats satisfaisants et clairs confirment que le recours à une formation rapide des pompes centrifuges à vitesse variables est la meilleure solution pour garder une bonne performance de la pompe.

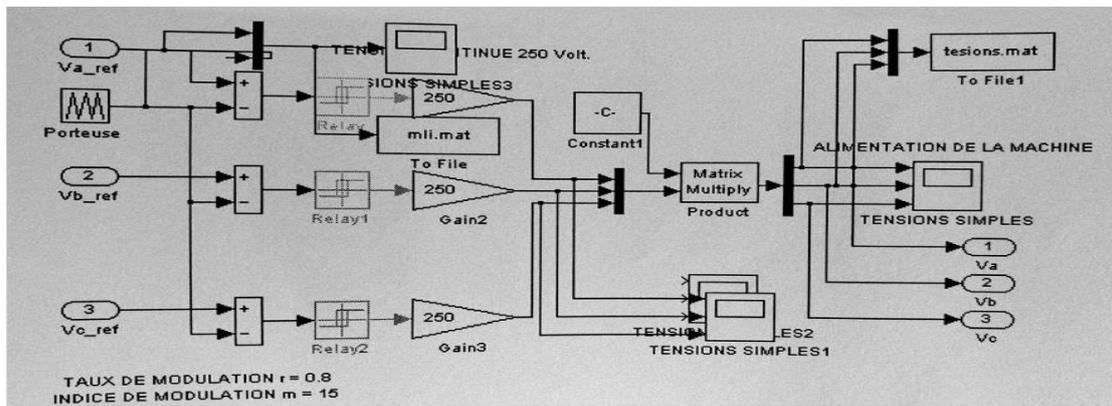
Références bibliographiques

- [1] Investigation expérimentale du phénomène de cavitation dans les pompes Université Kasdi Merbah–Ouargla - 2011 (KOUILED Slimane et SAYAH Laid)
- [2] Rapport de la pompe d'injection "GUINARD" 40-P-30004 de L'UNITE PW;
- [3] Ahmed misbah Youssef, PUMP TECHNOLOGY
- [4] thèse doctorant développement d'un modèle de cavitation a poche sur hydrofoils et hélice en régime transitoires. Implémentation sur codes potentiels et validation expérimentale.
- [5] Formation TOTAL: MAINTENANCE MECANIQUE LES POMPES
- [6] Centrifugal Pump User's Guidebook PROBLEMS AND SOLUTIONS;
SAM YEDIDIAH; CHAPMAN & HALL: 1996
- [7] DZIRI AHMED; FLOWSERVE POMPES Document Sonatrach-AGIP 29/09/2015
- [8] : séminaire de les pompe centrifuge ' IAP'
- [9] cours pompes centrifuge, hélico-centrifuges et axiales : cavitation présentée par Jean
- [10] : mémoire fin d'étude " les pompes centrifuge " préparer par G.tayeb et D.ferhat
- [11] : Machines électrique, clode chevassu, version 2012 ;
- [12] : cour, instrumentation, CTRA, vanne de régulation ;
- [13] www.depollunet.net/précisai-lesystème
- [14] Adel SAID et Yassine JEMAI, « Installation industrielles », Institut Supérieur des Etudes Technologiques de Nabeul, 2013.
- [15] Philippe Ladoux : « variation de vitesse des machines à courant alternatif », réseau national de ressources en électrotechnique, 1992.
- [16] BP/Sonatrach Ain amenas gas Project supplier documentation.

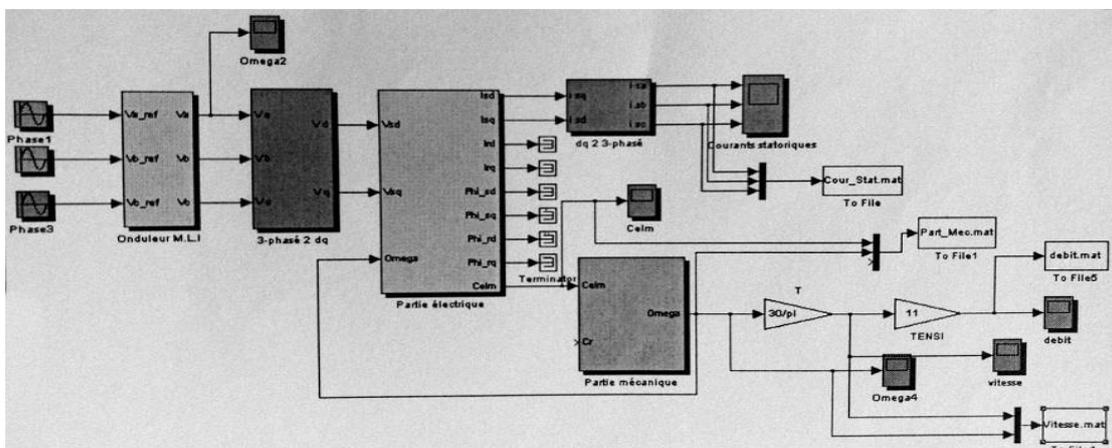
Annexes



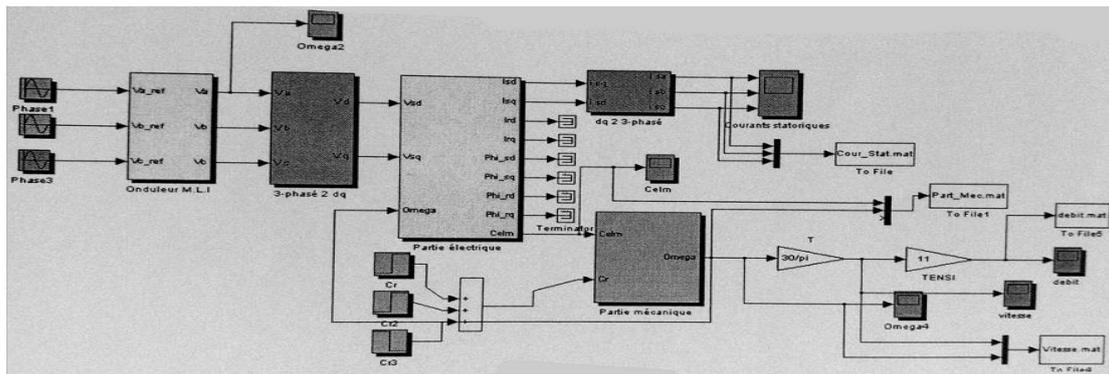
Bloc de simulation : la machine asynchrone



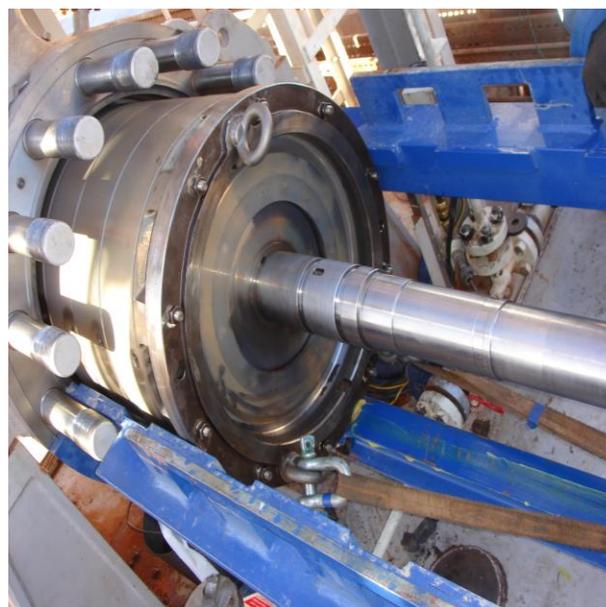
Modèle onduleur de tension triphasé avec la commande MLI



Bloc de simulation : l'association moteur asynchrone-onduleur MLI



Bloc de simulation : system de pompage



Démontage d'une pompe centrifuge (BP/ Sonatrach Ain amenas gas Project supplier documentation)

ملخص

شهدت انظمة التحكم في المحركات الكهربائية تطورا ملحوظا ، حيث ظهرت معايير جديدة سمحت لنا في إقتصاد الطاقة وريح الوقت ومن بين هذه المعايير ، إستبدال نظام التحكم في مضخة الطرد المركزي من نظام التحكم في تدفق المضخات عن طريق الصمامات الى نظام التحكم في السرعة وهذا بالتغيير في طول الموجة مايجعلنا نغير سرعة المحرك بدلالة التواتر ومنه تغيير تدفق المضخة حيث نستعمل برنامج المحكاة الرياضي لمعرفة مدى نجاعة النتائج المتحصل عليها ،وفي الأخير توصلنا إلى أن تغيير تدفق المضخة عن طريق تغيير السرعة باستعمال مبدل السرعة هي من أفضل أنظمة التحكم وأقلها تكلفة

الكلمات المفتاحية : مضخة الطرد المركزي ،التغيير في السرعة ،أنظمة التحكم

Résumé

Le contrôle des moteurs électriques a connu un nouveau développement, car de nouvelles normes nous ont permis d'économiser de l'énergie et de gagner du temps. Parmi ces normes, nous avons remplacé la system de commande de la pompe centrifuge, des vanes de régulation du débit aux régulateurs de vitesse, La modification du débit de la pompe en modifiant la vitesse à l'aide du variateur de vitesse est l'un des meilleurs éléments de contrôle et le plus économique.

Mots clés : les pompe centrifuge, les variateurs de vitesse, commande.

Abstract

The control of electric motors has undergone a new development these criteria allowed us to save energy and gain time. 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, It offers great flexibility in operating which is cheaper and This allows us to change the engine speed which in turn leads to differing flow The pump. This led us to offer a mathematical simulation program that Determines the effectiveness of the results obtained.

Keywords: Centrifugal pump, speed control systems, speed change.