

# الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

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



UNIVERSITE MOHAMED

SEDDIK BENYAHIA JIJEL

Faculté des sciences et de la technologie

Département d'électrotechnique

N° :...../2022

## **MEMOIRE DE MASTER**

**DOMAINE: Sciences et Technologies**

**FILIERE: Electromécanique**

**SPECIALITE: Electromécanique**

### **Thème**

**Modèle dynamique d'une unité de pompage électro-hydraulique entraînée  
par un moteur asynchrone**

**Présenté Par : ARADA Zakaria**

**Encadré Par : Dr. REZIG Ali**

**RIDA Hamza**

**Date de soutenance: 13/06/2022**

### **Jury de Soutenance**

**Président : BELLI – BOULASSEL Zoubida**

**Grade Professeur**

**UnivMSB jijel**

**Encadreur : REZIG Ali**

**Grade Professeur**

**Univ MSB jijel**

**Examineur 1:HACIB Tarik**

**Grade Professeur**

**Univ MSB jijel**

**Examineur 2: .....**

**Grade .....**

**Univ MSB jijel**

**Promotion : 2021 /2022**

## **Remerciements**

**Je tiens tout d'abord à remercier Dieu, le Tout  
Puissant**

**Et Miséricordieux, qui m'a donné la force et la  
patience**

**D'accomplir ce modeste travail.**

**Je remercie mon encadreur Pr .REZIG ALI pour  
ses précieux conseil et son aide durant toute la  
période du travail.**

**Enfin, je tiens également à remercier toutes les  
personnes**

**qui ont participé de près ou de loin à la  
réalisation de ce**

**Mémoire.**

**Arada Zakaria**

## **Remerciements**

**Tout d'abord nous rendons grâce à Dieu, lui qui nous a permis d'être bien portant afin d'effectuer ce travail du début jusqu'à la fin. Nous remercions nos parents respectifs pour leurs soutiens durant notre parcours de formation.**

**Je remercie mon encadreur Pr.REZIG ALI pour ses précieux conseil et son aide durant toute la période du travail.**

**Je tiens à remercier aussi : Les membres de jury pour avoir accepté d'évaluer mon travail**

**Rida Hamza**

## **Dédicaces**

**Je dédie ce modeste travail en signe de  
reconnaissance et de respect :**

**A mes très chers parents que Dieu les  
protège**

**A tous mes frères**

**A tous Mes amis sans exception**

**Arada Zakaria**

## **Dédicaces**

- **Je dédie ce travail à mes parents**

**Pour tous les encouragements qu'ils nous  
ont fournis malgré leur lourde  
responsabilité .Que dieu inchaa Allah les  
garde pour nous.**

- **A toute la promotion d'électromécanique**
  - **A mon encadreur Pr .REZIG**

**Rida Hamza**

# SOMMAIRE

## Sommaire

Introduction generale .....	2
Chapitre I : Pompes entrainées par les moteurs électrique .....	4
Introduction .....	5
I.1 Pompes : Définition et principe de fonctionnement .....	5
I.2 Classification des pompes .....	7
I.2.1 Pompes volumétriques .....	8
I.2.1.1 Pompes volumétriques alternatives .....	8
I.2.1.2 - Pompe volumétrique rotative .....	9
I.2.1.2.1 Pompes à palettes libres .....	9
I.2.1.2.2 Pompes à engrenages .....	9
I.2.2 Turbopompes .....	10
I.2.2.1 Pompes centrifuges .....	10
I.2.2.1.1 Définition .....	10
I.2.2.1.2 -Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge .....	11
I.2.2.1.3 Avantages et inconvénients des pompes centrifuges [3] .....	12
I.2.2.1.4 Constitution d'une pompe centrifuge .....	12
I.2.2.1.5 Théorie des pompes centrifuges [5] .....	14
I.2.2.1.5.1 Critères généraux de définition des pompes .....	14
I.2.2.1.5.2 Types des pertes dans les pompes .....	14
I.2.2.1.5.3 Rendement .....	15
I.3 Exemple de calcul des caractéristiques d'une pompe .....	16
Cocclusion .....	21
Chapitre II. Modélisation de l'ensemble moteur asynchrone-pompe .....	22
Introduction .....	23
II.1 Constitution de la machine asynchrone .....	23
II.1.1 Stator .....	24
II.1.2 Rotor .....	25
II.1.3 Entrefer .....	25
II.1.4 Organes mécaniques .....	26
II.2 Modélisation de la machine asynchrone triphasée (MAS) .....	26

II.2.1	Equations électriques.....	27
II.2.2	Equations mécaniques .....	29
II.3	Transformation de Park .....	30
II.3.1	Equations électriques et magnétiques.....	31
II.4	Modélisation de l'ensemble moteur asynchrone- pompe .....	32
II.4.1	Commande de la pompe .....	34
II.4.2	Commande à vitesse constante.....	34
II.4.3	Commande à vitesse variable .....	34
	Conclusion.....	36
Chapitre III. Fonctionnement de l'ensemble moteur-pompe en utilisant une commande tension-fréquence .....		
		37
	Introduction .....	38
III.1	Commande v/f pour la variation de la vitesse d'un moteur asynchrone .....	38
III.2	Association moteur pompe sans la commande (V/f).....	41
III.3	Association moteur pompe avec la commande (V/f) .....	44
	Conclusion.....	47
	Conclusion generale .....	49

## Liste des figures

<i>Figure I-1</i> différents types de pompes .....	7
<i>Figure I-2</i> Pompes à piston .....	8
<i>Figure I-3</i> Pompes à palettes libres .....	9
<i>Figure I-4</i> Pompes à engrenage .....	10
<i>Figure I-5</i> Schéma d'une pompe centrifuge .....	11
<i>Figure I-6</i> Types des roues (rotors) .....	12
<i>Figure I-7</i> Coupes d'une pompe centrifuge monocellulaire .....	13
<i>Figure I-8</i> Schéma représente les caractéristiques du réseau extérieur .....	19
<i>Figure I-9</i> Courbe caractéristique d'une pompe fournit par le constructeur .....	20
<i>Figure II-1</i> Constitution de la machine asynchrone .....	24
<i>Figure II-2</i> schéma présente l'enroulement du stator .....	24
<i>Figure II-3</i> Vue d'un rotor à cage .....	25
<i>Figure II-4</i> Vue d'un rotor bobiné .....	25
<i>Figure II-5</i> Schéma désignant les éléments constituant une machine asynchrone .....	26
<i>Figure II-6</i> Référentiel tournant d'axes ( $d-q$ ) .....	31
<i>Figure II-7</i> schéma de l'association moteur-pompe .....	32
<i>Figure II-8</i> courbe caractéristique d'une pompe .....	33
<i>Figure II-9</i> Caractéristiques de la pompe pour différentes vitesses .....	35

<i>Figure II-10 Schéma entraînement à vitesse variable pour la commande du débit d'une pompe</i>	35
<i>Figure II-11 schéma de l'association du moteur d'entraînement de la pompe aux convertisseurs</i>	36
<i>Figure III-1 Caractéristique couple vitesse du moteur</i>	40
<i>Figure III-2 caractéristique tension/fréquence pour une commande (v/f)</i>	40
<i>Figure III-3 caractéristique couple vitesse pour commande par le rapport (v/f) constant</i>	41
<i>Figure III-4 Schéma du modèle moteur-pompe implémenté dans Matlab-Simulink</i>	42
<i>Figure III-5 vitesse du moteur asynchrone en fonction du temps</i>	43
<i>Figure III-6 Courant de la phase a du stator en fonction du temps</i>	43
<i>Figure III-7 Débit de la pompe en fonction du temps pour deux valeurs de la hauteur h</i>	44
<i>Figure III-8 Modèle Matlab-Simulink de l'ensemble moteur-pompe avec la commande (v/f)</i>	45
<i>Figure III-9 Vitesse de la rotation du moteur</i>	45
<i>Figure III-10 Courant dans la phase A en fonction de temps</i>	46
<i>Figure III-11 Débit de la pompe en fonction du temps pour deux valeurs du hauteur h</i>	46

# **INTRODUCTION**

## **GENERALE**

## **INTRODUCTION GENERALE**

Les pompes sont de plus en plus utilisées dans l'industrie aussi bien pour des applications domestiques. C'est un élément très essentiel qui permet de véhiculer un liquide ou un fluide d'un niveau à un autre.

Pour le choix de type de pompe le plus approprié, le succès du choix dépendra de plusieurs facteurs tels que la criticité du processus, les heures de pompage nécessaires, les données physiques du pompage, c'est-à-dire le type de fluide à pomper, son débit, sa pression, sa température, son élévation, etc.

Une pompe peut être une pompe volumétrique ou une turbopompe (pompe centrifuge). Les caractéristiques d'une pompe sont généralement fournies par le constructeur. Ces caractéristiques sont montrées sur une courbe qui montre la variation de la hauteur de pompage en fonction de débit de la pompe.

L'entraînement de la pompe est effectué par une turbine mais généralement cela est effectué grâce à un moteur électrique. Le moteur qui donne beaucoup de satisfaction dans ce domaine est le moteur asynchrone triphasé. Cela est justifié par les multiples avantages de ce moteur, dont les plus importants sont la robustesse et le rapport couple/volume relativement important.

Les performances d'une installation de pompage dépendent du comportement de l'ensemble moteur-pompe. En effet c'est à partir du débit souhaité et la hauteur de pompage qu'on peut déterminer caractéristique du moteur d'entraînement.

L'objectif de ce travail de Master est de modéliser l'ensemble moteur asynchrone-pompe. L'objectif est d'étudier l'effet du comportement du moteur sur les performances de la pompe.

Ce mémoire est partagé en trois chapitres

Le premier chapitre est consacré à la définition et la classification des pompes. Un calcul détaillé des caractéristiques d'une pompe est présenté à la fin de ce chapitre. C'est un calcul qui permet de définir la puissance que le moteur d'entraînement doit fournir.

Le deuxième chapitre présente le modèle mathématique de l'ensemble moteur asynchrone-pompe. Les entrées du modèle de pompe sont la vitesse de rotation du moteur, le couple développé et la hauteur du pompage. La sortie est le débit de la pompe. Le chapitre aussi présente une section très importante sur les courbes caractéristiques d'une pompe. Cela permet une bonne lecture de cette courbe.

Le dernier chapitre de ce mémoire est consacré à la mise en œuvre du modèle mathématique de l'ensemble moteur asynchrone-pompe. L'objectif est d'améliorer les performances de l'installation du pompage pendant le démarrage.

Enfin ce mémoire terminera par une conclusion générale et des perspectives.

# **Chapitre I. Pompes entraînées par les moteurs électrique**

## INTRODUCTION

Le pompage est une fonction indispensable dans tous les systèmes industriels. Cette fonction est réalisée généralement par des pompes entraînées par des moteurs électriques. Ce chapitre présente la pompe de manière détaillée. L'accent est mis particulièrement sur les éléments constituant une pompe, son principe de fonctionnement et les différents types. Enfin nous présentons un calcul par des formules empiriques qui permettent un choix convenable de la pompe et le moteur d'entraînement.

### I.1 Pompes : Définition et principe de fonctionnement

Une pompe est une machine hydraulique qui aspire un fluide d'une région à basse pression pour le refouler vers une région à plus grande pression. Ainsi d'après cette définition on peut dire que le rôle de la pompe consiste à augmenter la pression du fluide liquide. L'augmentation de la pression du fluide véhiculé par la pompe a lieu à la suite de la transformation de l'énergie mécanique fournie par un moteur entraînant cette pompe en une augmentation de l'énergie hydraulique qui est acquise par le liquide entre l'entrée et la sortie de la pompe.

La pompe est destinée à élever la charge du liquide pompé. La charge ou l'énergie est la somme de trois catégories d'énergie :

- ❖ Energie cinétique.
- ❖ Energie potentielle.
- ❖ Energie de pression.

Une pompe qui fournit un débit fixe est appelée pompe à cylindre fixe. Ce type est le plus utilisé dans les circuits hydrauliques industriels.

Dans les pompes à cylindre fixe, la quantité de débit qui doit être déplacée par chaque rotation de l'arbre de la pompe ne peut pas être modifiée. Ainsi, le déplacement de la pompe n'est modifié qu'en changeant la vitesse de la pompe. Étant donné que les systèmes hydrauliques industriels utilisent généralement des moteurs électriques à vitesse constante comme moteurs principaux, les pompes à cylindrée fixe ne trouvent pas beaucoup d'applications. [1]

Une pompe qui fournit un débit variable est appelée pompe à cylindrée variable. La technologie de base est la même que le type à débit fixe mais le mécanisme interne de ces pompes peut faire varier la cylindrée.

Ces pompes à cylindrée variable ne délivrent un débit que et selon les besoins du système.

Les pompes à cylindrée variable offrent un avantage supplémentaire car la chaleur n'est pas générée par le déplacement de l'huile dans le circuit lorsqu'aucun travail sur l'actionneur n'est effectué. Même lorsqu'une pompe à cylindrée fixe est déchargée (avec une vanne centrale en tandem), l'énergie est convertie en chaleur, la simple raison étant que l'huile est en mouvement. D'autre part, la pompe à cylindrée variable peut être contrôlée pour produire de l'énergie uniquement lorsque cela est nécessaire. Ainsi, lorsqu'aucune chaleur n'est développée, aucune énergie n'est gaspillée. De plus, les pompes à cylindrée variable éliminent ou réduisent souvent le besoin de vannes de régulation de débit et de réduction de pression, et donc ces pompes coûtent beaucoup plus cher. [2]

## I.2 Classification des pompes

Ce schéma représente les types de pompe

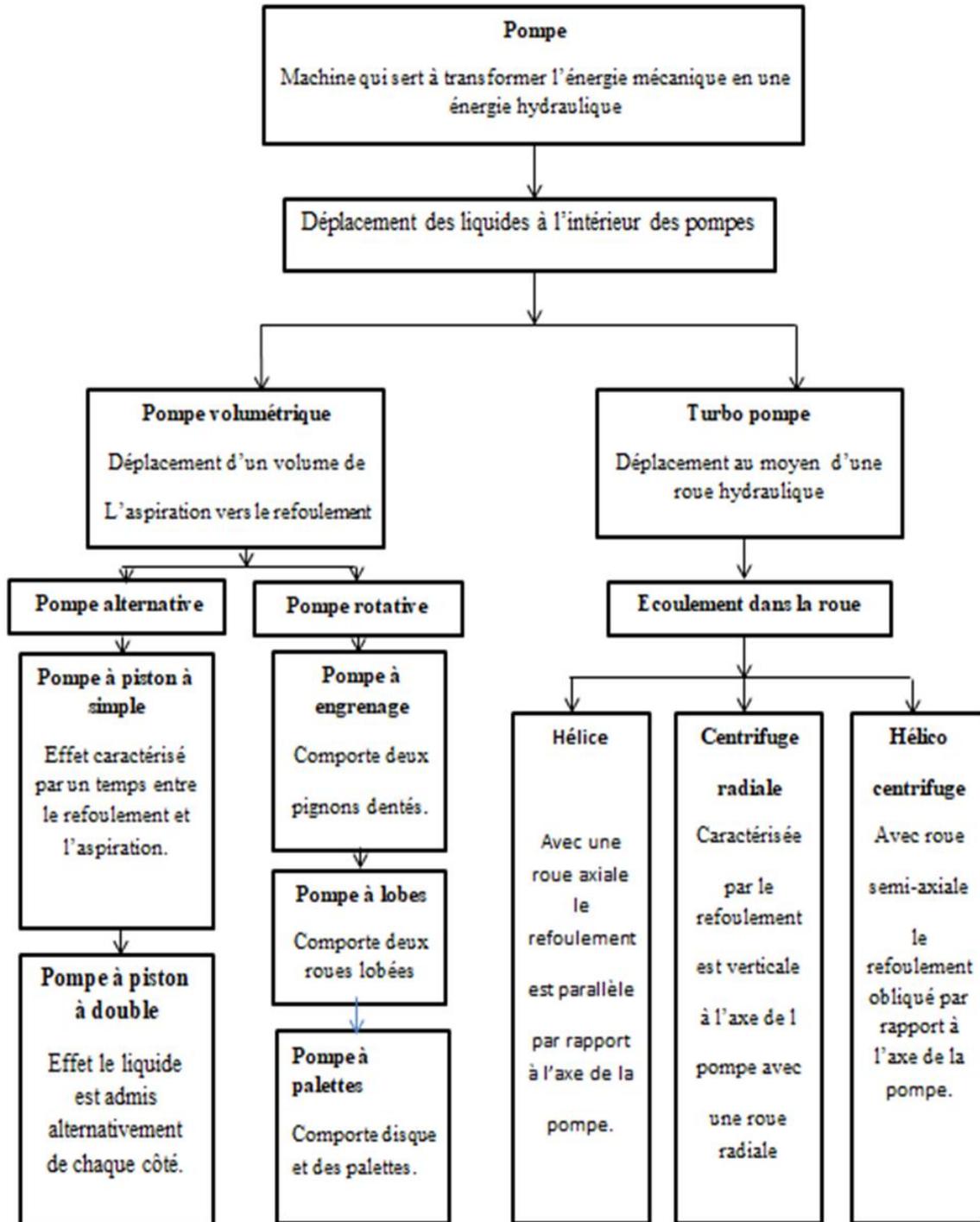


Figure I-1 différents types de pompes

## I.2.1 Pompes volumétriques

Une pompe volumétrique se compose d'un corps de pompe parfaitement clos à l'intérieur duquel se déplace un élément mobile rigoureusement ajusté.

Ces pompes volumétriques sont généralement à auto-amorçages.

Elles permettent d'obtenir des hauteurs manométriques totales beaucoup plus élevées que les pompes centrifuges. La pression au refoulement est ainsi plus importante. Le débit est par contre généralement plus faible mais il ne dépend pratiquement pas des caractéristiques du réseau.

Le rendement de ce type de pompes est souvent voisin de 90 %.

### I.2.1.1 Pompes volumétriques alternatives

La pièce mobile est animée d'un mouvement alternatif. Généralement, ces pompes sont à piston.

Son principe est d'utiliser les variations de volume occasionnées par le déplacement d'un piston dans un cylindre ; ces déplacements alternativement dans un sens ou dans l'autre produisent des phases d'aspiration et de refoulement. Quand le piston se déplace dans un sens le liquide est comprimé.

Il y a fermeture du clapet d'admission et ouverture du clapet de refoulement est le fonctionnement est inverse lors de l'aspiration du liquide dans la pompe. [3]

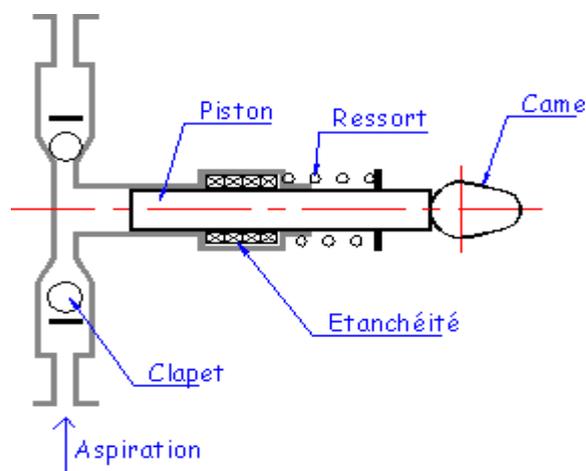


Figure I-2 Pompes à piston

### I.2.1.2 - Pompe volumétrique rotative

La pièce mobile est animée d'un mouvement de rotation autour d'un axe, qui tourne dans le corps de pompe et crée le mouvement du liquide pompé par déplacement d'un volume depuis l'aspiration jusqu'au refoulement. On cite deux types de pompes rotatives.

#### I.2.1.2.1 Pompes à palettes libres

Un corps cylindrique fixe communique avec les orifices d'aspiration et de refoulement. A l'intérieur se trouve un cylindre plein, le rotor, tangent intérieurement au corps de la pompe et dont l'axe est excentré par rapport à celui du corps. Le rotor est muni de 2 à 8 fentes diamétralement opposées deux à deux, dans lesquelles glissent des palettes que des ressorts appuient sur la paroi interne du stator. [4]

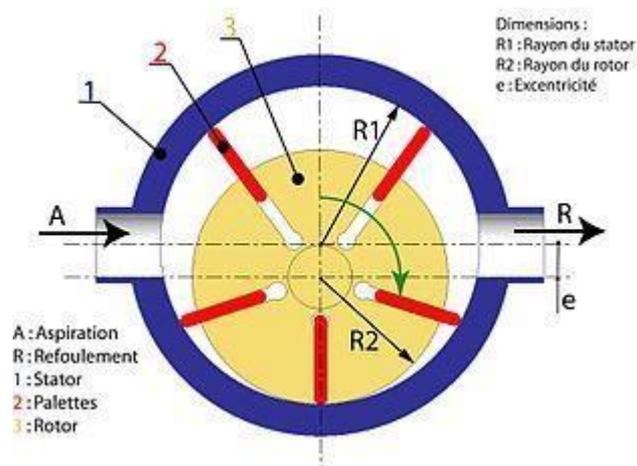


Figure I-3 Pompes à palettes libres

#### I.2.1.2.2 Pompes à engrenage

Elle est constituée par deux engrenages tournant à l'intérieur du corps de pompe. Le principe consiste à aspirer le liquide dans l'espace compris entre deux dents consécutives et à le faire passer vers la section de refoulement.

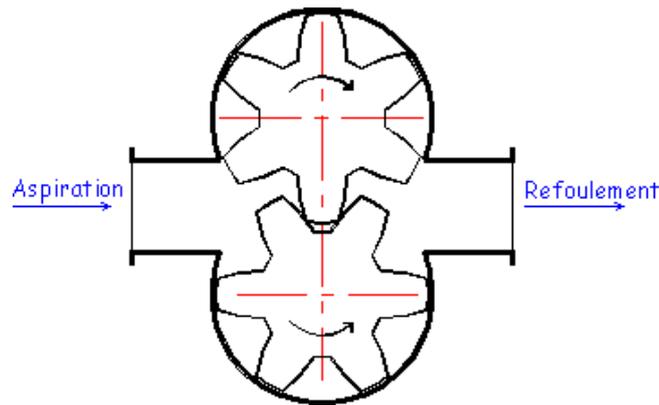


Figure I-4 Pompes à engrenages

## I.2.2 Turbopompes

Les pompes hydrodynamiques sont de construction très simple, en version de base, elles sont essentiellement constituées d'une pièce en rotation, le rotor appelé aussi roue ou hélice qui tourne dans un carter appelé corps de pompe, une certaine vitesse est ainsi communiquée au fluide.

Parmi les types de turbopompes on cite ; les pompes centrifuges, les pompes hélico-centrifuges et les pompes à hélices ; la différence entre ces pompes porte essentiellement sur la direction de la vitesse donnée au fluide.

### I.2.2.1 Pompes centrifuges

#### I.2.2.1.1 Définition

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.

Les pompes centrifuges sont composées d'une roue à aubes qui tourne autour de son axe, d'un stator constitué au centre d'un distributeur qui dirige le fluide de manière adéquate à l'entrée de la roue, et d'un collecteur en forme de spirale disposé en sortie de la roue appelé volute.

### I.2.2.1.2 -Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge

On peut décomposer le fonctionnement d'une pompe centrifuge en trois étapes :

- **L'aspiration**

Le liquide est aspiré au centre du rotor par une ouverture appelée distributeur dont le rôle est de conduire le fluide depuis la conduite d'aspiration jusqu'à la section d'entrée du rotor. La pompe étant amorcée, c'est-à-dire pleine de liquide, la vitesse du fluide qui entre dans la roue augmente et par conséquent la pression dans l'ouïe diminue et engendre ainsi une aspiration et maintient l'amorçage.

- **L'accélération**

Le rotor transforme l'énergie mécanique appliquée à l'arbre de la machine en énergie cinétique. A la sortie du rotor, le fluide se trouve projeté dans la volute dont le but est de collecter le fluide et de le ramener dans la section de sortie.

- **Le refoulement**

Dans l'élargissement en sortie, qui se comporte comme un divergent, le liquide perd de la vitesse au profit de l'accroissement de pression : l'énergie cinétique est convertie en énergie de pression au niveau de diffuseur.

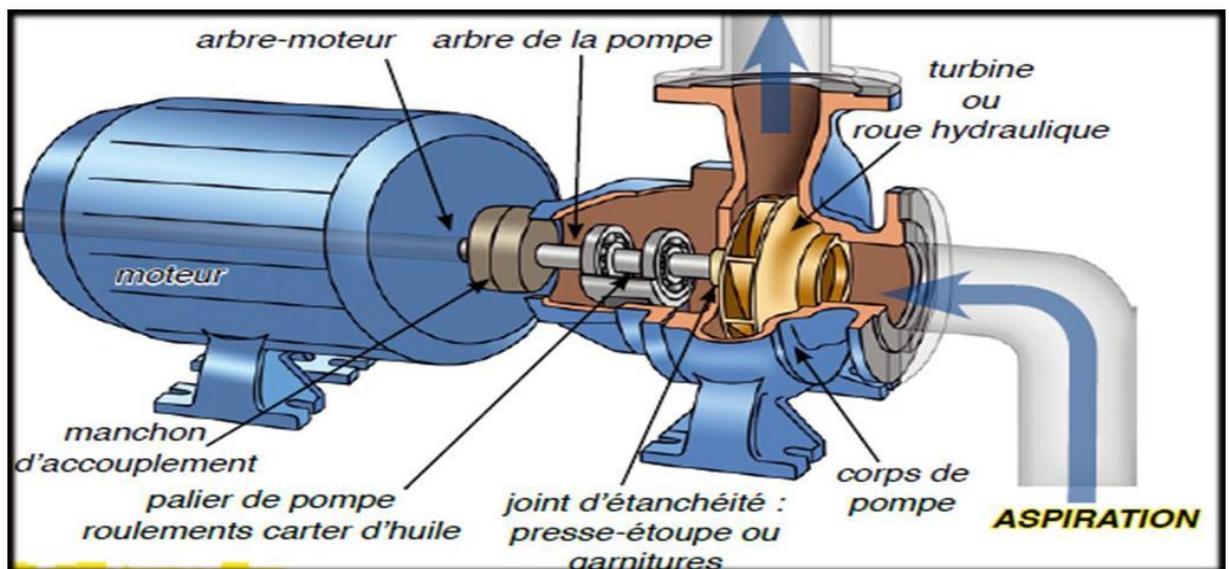


Figure I-5 Schéma d'une pompe centrifuge

### I.2.2.1.3 Avantages et inconvénients des pompes centrifuges [3]

#### a- Avantages des pompes centrifuges

- construction simple, peu de composants mobiles, longue durée de service
- débit de refoulement facile à ajuster par une soupape à la sortie de la pompe ou par la vitesse de rotation
- vitesse de rotation élevée, entraînement direct possible par moteur électrique ou turbine
- limiteur de pression intégré, pas de soupape de sécurité requise
- refoulement continu sans pulsations
- conviennent à des puissances élevées

#### b- Inconvénients des pompes centrifuges

- risque de cavitation avec de l'eau chaude ou des pressions d'aspiration faibles
- le débit volumétrique dépend de la pression de refoulement
- plusieurs étages requis pour les pressions de refoulement élevées

### I.2.2.1.4 Constitution d'une pompe centrifuge

La pièce essentielle est la roue portant des aubes (profils courbés) l'écoulement du fluide sur ces aubes provoque l'échange d'énergie entre la veine liquide et l'arbre de la machine, elle est constituée des :

#### a- Organe mobile (roue)

Il est en mouvement continu (rotation) muni d'aubes fixes à des disques tournants à l'intérieur du corps de la pompe, on distingue 3 sortes de roues :

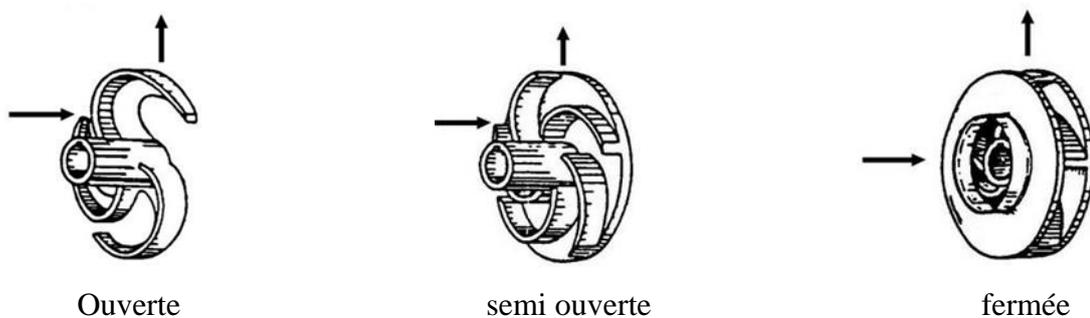


Figure I-6 Types des roues (rotors)



### **I.2.2.1.5 Théorie des pompes centrifuges [5]**

#### **I.2.2.1.5.1 Critères généraux de définition des pompes**

Les critères les plus importants sont :

##### **a- Vitesse de rotation $n$ [tr/min]**

C'est le nombre de tours qu'effectue la pompe par unité de temps.

$$\omega = 2\pi \cdot n/60 \text{ [rd/sec]} \quad (\text{I.1})$$

##### **b- Débit $Q$ [m<sup>3</sup>/s]**

C'est le volume qu'une pompe peut ou doit fournir par unités de temps.

$$Q = v/s \text{ [m}^3\text{/s]} \quad (\text{I.2})$$

##### **b- Hauteur $H$ [m] produite par la pompe**

Cette hauteur est la différence entre la hauteur totale du liquide au refoulement (HR) et la hauteur totale à l'aspiration (HA).

$$H = H_r - H_a \text{ [m]} \quad (\text{I.3})$$

#### **I.2.2.1.5.2 Types des pertes dans les pompes**

Dans la pompe centrifuge :

##### **a. Pertes mécaniques**

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

##### **b. Pertes par fuites**

- ✓ Fuite d'une garniture d'ouïe mono étage.

- ✓ Fuite dans une garniture d'ouïe bi étage.
- ✓ Fuite sur barrage arrière d'une roue équilibrée.
- ✓ Fuite au piston d'équilibrage.
- ✓ Fuite à l'extrémité des aubes.
- ✓ Fuite externes

### **c. Pertes hydrauliques**

Les pertes hydrauliques sont constituées par :

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

#### **I.2.2.1.5.3 Rendement**

Le rendement de la pompe c'est le rapport entre la puissance hydraulique (reçue par le liquide) et la puissance mécanique fournie à la pompe. Ce rendement varie en fonction du débit.

Le constructeur de la pompe représente le rendement de la pompe par une courbe sur l'arbre connaissant la puissance hydraulique.

Le meilleur rendement de la pompe détermine le débit nominal pour lequel correspondent la hauteur nominale et la puissance nominale. Les rendements maximaux sont de l'ordre de :

-70 % pour les pompes procédant à 3000 tr/min

-80 % pour les pompes procédant à 1500 tr/min

-80 % pour les pompes de forte puissance

-50 à 60 % pour les petites pompes.

$$\text{Rendement globale} \quad n_s = \frac{p_u}{p_a} \quad (\text{I.4})$$

$$\text{Rendement mécanique:} \quad n_{mec} = \frac{p_i}{p_a} \quad (\text{I.5})$$

$$\text{Rendement par frottement interne :} \quad n_{fi} = \frac{p_i - p_f}{p_i} \quad (\text{I.6})$$

$$\text{Pi: Puissance interne} \quad p_i = p_a - p_{mec} \quad (\text{I.7})$$

$P_{mec}$ : puissance mécanique

$P_{fi}$  : puissance par frottement sur disque et sur cylindre

### I.3 Exemple de calcul des caractéristiques d'une pompe

Soit une installation de pompage contient les données suivantes

- Débit demandé des installations de pompage  $Q_d = 14375 \text{ m}^3/\text{s}$
- La hauteur géométrique d'élévation  $H_g = 285\text{m}$
- La hauteur d'aspiration  $H_{asp} = 4\text{m}$
- La longueur de la conduite de refoulement  $L_{ref} = 403\text{m}$
- La longueur de la conduite d'inspiration  $L_{asp} = 6\text{m}$
- Sommes des coefficients des pertes de charges locales  $\sum \xi = 25$

1. Déterminer le diamètre de la conduite de refoulement ?

2. Déterminer le diamètre de la conduite d'aspiration ?

3. Déterminer la hauteur manométrique nécessaire?

4. faire un choix de la pompe?

#### 1) Calcule de la hauteur géométrique

$$[H_g] = [H_a] + [H_m] + [H_s] \quad (I.8)$$

Avec :

$H_a = 8\text{m}$  La hauteur géométrique d'aspiration

$H_m = 81\text{m}$  La profondeur de la mine

$H_s = 1\text{m}$  La hauteur de monté d'eau au niveau du jour

$$H_g = 8 + 81 + 1 = 100\text{m}$$

## 2) Longueur de la conduite d'installation

$$[L] = [L_{asp}] + [L_{ref}] \quad (I.9)$$

Avec :

La longueur de la conduite d'aspiration

$$L_{asp} = 8,5\text{m}$$

La longueur de la conduite de refoulement  $L_{ref} = 3000\text{m}$

$$L = 8,5 + 3000 = 3008,5\text{m}$$

## 3) Vitesse d'écoulement dans la conduite de refoulement

La vitesse d'écoulement dans la conduite de refoulement est déterminée par l'indice technico-économique, mais dans la pratique on peut utiliser la formule suivante :

$$V_{op} = 0,54 \sqrt[4]{Q_d} \text{ m/s}$$

$$V_{op} = 0,54 \sqrt[4]{260} = 2,16 \text{ m/s}$$

## 4) Diamètre de la conduite de refoulement

$$D_{ref} = \sqrt{\frac{Q_d}{900\pi V_{opt}}} \quad (I.10)$$

$$D_{ref} = \sqrt{\frac{260}{900(3,14)(216)}} = 0,201\text{mm}$$

D'après le diamètre standardiser en adopte le diamètre

$$D_{ref} = 250\text{mm}$$

### 5) Diamètre de la conduite d'aspiration

$$D_{asp} = D_{ref} + 50$$

$$D_{asp} = 250 + 50 = 300\text{mm}$$

$$D_{asp} = 300\text{mm}$$

### 6) Calcul de la hauteur manométrique nécessaire :

$$H_c = H_g + \left( \lambda \frac{L}{D_{ref}} + \sum \xi + 1 \right) \frac{v_{ref}^2}{2g} \quad (\text{I.11})$$

$\lambda$  coefficient de frottement

La hauteur géométrique d'élévation :

$$H_g = 100\text{m}$$

La longueur de la conduite d'aspiration  $L = 3008,5\text{m}$

$D_{ref} = 250\text{mm}$  Le diamètre de la conduite de refoulement

$\lambda$  Coefficient de frottement hydraulique

$$\lambda = \frac{0,0195}{\sqrt[3]{D_{ref}}} = \frac{0,0195}{\sqrt[3]{0,25}} = 0,03$$

$\sum \xi$  Somme des Coefficient des pertes de charges locales

$$\sum \xi = 3,08 + 2,45 + 0,091 + 4,18 = 10,05$$

La vitesse réelle d'écoulement d'eau

$$V_{réel} = \frac{Q_d}{900\pi D_{ref}^2} = \frac{260}{900(3,14)(0,25)^2} = 1,47 \text{ m/s}$$

$$H_c = 100 + \left( 0,03 \frac{3008,5}{0,25} + 10,05 + 1 \right) \frac{(1,47)^2}{2,10} = 140,2 \text{ m}$$

$$H_c = 140,2 \text{ m}$$

7) Caractéristique du réseau extérieur

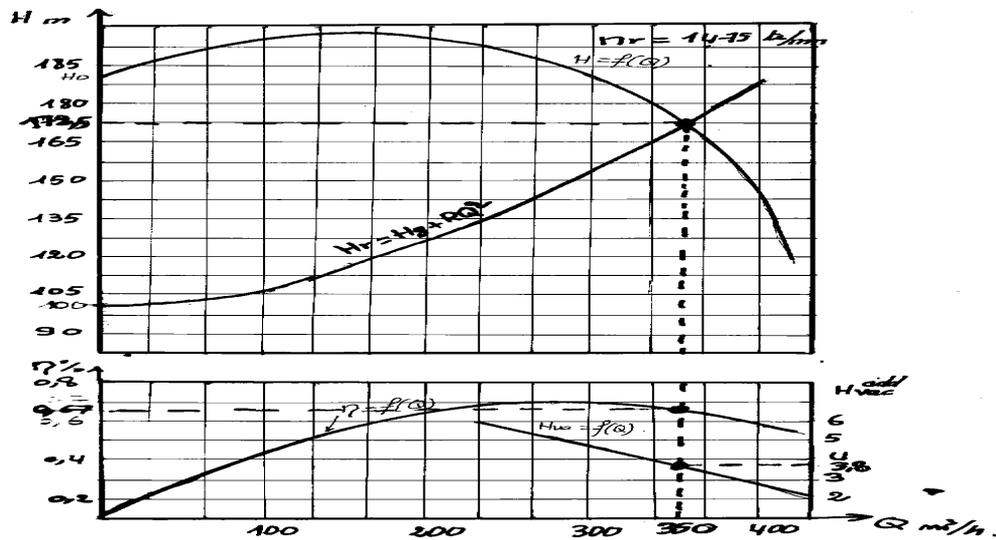


Figure I-8 Schéma représente les caractéristiques du réseau extérieur

Le régime de fonctionnement de la pompe choisie est :

$$Q_r = 350 \text{ m}^3/\text{h} \quad H_r = 172,2 \text{ m} \quad \eta_r = 76\% \quad H_{vac}^{adm} = 3,8 \text{ m}$$

8) Détermination de la puissance

$$N_{mot} = 1,1 \frac{Q_r \cdot H_r \cdot \rho_m \cdot g}{\eta_r \cdot 3,6 \cdot 10^6} \tag{I.12}$$

$Q_r = 350 \text{ m}^3/\text{h}$  : Le débit réel

$H_r = 172,5 \text{ m}$  : La hauteur réelle créée par la pompe

$\rho_m = 1020 \text{ kg}/\text{m}^3$  : La densité d'eau de mine

$$N_{mot} = 1,1 \frac{350 \cdot 172,5 \cdot 1020 \cdot 10}{0,673 \cdot 6 \cdot 10^6} = 280 \text{ KW}$$

D'après la puissance et la vitesse de rotation du moteur on choisit le moteur du type **(A.3.355M-4)**

- La puissance nominale .....320 kW
- La vitesse de rotation .....1475 tr/min
- Le rendement..... 94,5 %

### 9) Choix de la pompe

Le choix de type de pompe se fait d'après le champ des pompes du constructeur. On fixe les coordonnées calculées  $H_c = 140,2 \text{ m}$  et  $Q_d = 260 \text{ m}^3/\text{h}$  sur le champ des pompes du constructeur.

Le point d'intersection nous indique le type de la pompe convenable.

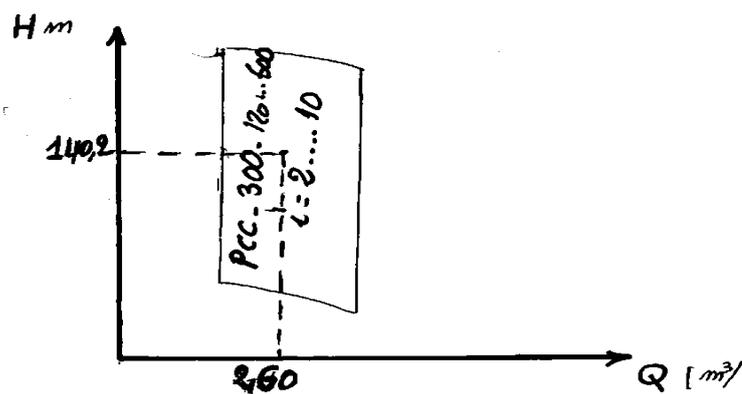


Figure I-9 courbe caractéristique d'une pompe fournie par le constructeur

## **CONCLUSION**

Dans ce chapitre nous avons abordé les pompes dans les systèmes industriels. Cet élément permet de véhiculer un fluide d'un niveau à un autre. Selon les caractéristiques de pompage désiré, il existe plusieurs types de pompes. Les plus utilisées sont les pompes centrifuges. Le calcul présenté à la fin du chapitre permet un choix convenable de la pompe et du moteur d'entraînement en se basant sur la courbe caractéristique fournie par le constructeur.

## **Chapitre II. Modélisation de l'ensemble moteur asynchrone-pompe**

## INTRODUCTION

Le moteur asynchrone, ou moteur à induction, est le moteur le plus utilisé dans la plupart des entraînements électrique. Son principal avantage réside dans l'absence de contacts électriques glissants, ce qui conduit à une structure simple, robuste mécanique et facile à construire, leur stator est relié directement au réseau industriel à tension et fréquence constante, il tourne à vitesse peu différente de la vitesse de synchronisme; c'est lui qui est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité des entraînements à vitesse constante.

Il permet aussi la réalisation d'entraînements à vitesse variable et la place qu'il occupe dans ce domaine ne cesse de croître. Ce moteur est largement utilisé dans les installations de pompage. Il fournit de la puissance mécanique à la pompe. Ce chapitre est consacré à la présentation et la modélisation du moteur asynchrone ainsi que l'ensemble moteur- pompe.

### II.1 Constitution de la machine asynchrone

La machine asynchrone est composée d'une partie fixe appelée stator et d'une partie tournante appelée rotor (figure II.1).

Contrairement aux machines synchrone et à courant continu, seul les enroulements statoriques sont couplés à un réseau d'alimentation dont les tensions (amplitude et fréquence) définissent l'état magnétique de l'entrefer. Les enroulements du rotor sont raccordés sur eux-mêmes. Le moteur asynchrone ne possède donc ni enroulement d'excitation ni aimants permanents. Pour ce qui est du flux rotorique nécessaire pour la formation du couple électromagnétique, il est produit à partir de l'induction. La figure (II.1) représente la machine asynchrone. Du point de vue mécanique, la machine asynchrone est subdivisée en trois parties distinctes :

- ❖ Le stator : partie immobile est la partie où est connectée l'alimentation électrique
- ❖ Le rotor : partie tournante, elle permet de mettre en rotation la charge magnétique
- ❖ Les paliers : organes de support, ces derniers constituent la partie mécanique Permettant ainsi la mise en rotation de l'arbre moteur.
- ❖ L'entrefer : Cette partie est amagnétique (c'est le vide entre le rotor et le stator). [7]

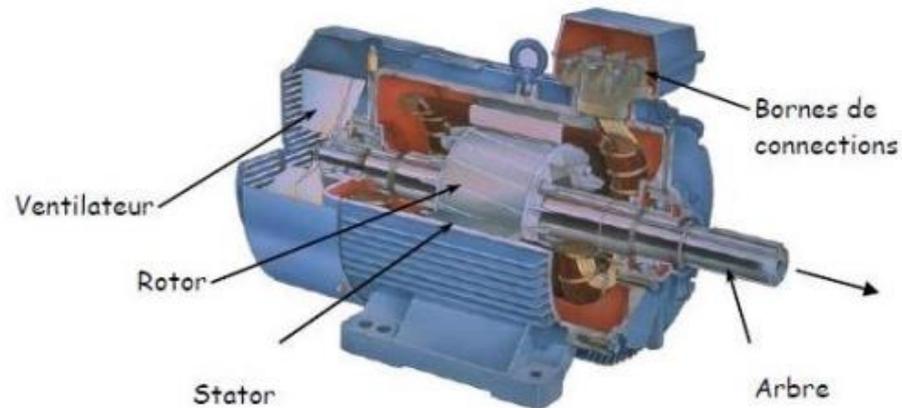


Figure II-1 Constitution de la machine asynchrone[8]

### II.1.1 Stator

C'est la partie fixe du moteur. Une carcasse en fonte ou en alliage léger renferme une couronne de tôles minces (de l'ordre de 0,5 mm d'épaisseur) en acier au silicium. Les tôles sont isolées entre elles par oxydation ou par un vernis isolant. Le « feuilletage » du circuit magnétique réduit les pertes par hystérésis et par courants de Foucault. Les tôles sont munies d'encoches dans les quelles prennent place les enroulements statoriques destinés à produire le champ tournant (trois enroulements dans le cas moteur triphasé).

Chaque enroulement est constitué de plusieurs bobines. Le mode de couplage de ces bobines entre elles définit le nombre de paires de pôles du moteur, donc la vitesse de rotation. [8]



Figure II-2 schéma présente l'enroulement du stator

### II.1.2 Rotor

C'est l'élément mobile du moteur. Il est constitué d'un empilage de tôles minces isolées entre elles et formant un cylindre claveté sur l'arbre du moteur. Cet élément, de par sa technologie, permet de distinguer deux familles de moteurs asynchrone : ceux dont le rotor est dit « à cage », et ceux dont le rotor bobiné est dit « à bagues ».



Figure II-3 Vue d'un rotor à cage



Figure II-4 Vue d'un rotor bobiné

### II.1.3 Entrefer

Cette partie amagnétique (c'est un vide entre le stator et le rotor) est d'épaisseur la plus faible (de l'ordre du millimètre), cette épaisseur réduite rend la taille de l'entrefer sensible aux variations dues aux encoches statorique. Ceci crée des harmoniques dites d'encoches, pour les réduire, les encoches sont fermées par des cales magnétiques qui maintiennent le bobinage. [9]

### II.1.4 Organes mécaniques

La carcasse sert de support, elle joue le rôle d'enveloppe et assure la protection contre l'environnement extérieur. L'arbre est un organe de transmission. Il comprend une partie centrale qui sert de support au corps du rotor il est supporté par un ou plusieurs paliers. Ces derniers soutiennent le rotor et assurent la libre rotation. Le second palier est libre pour assurer les dilatations thermiques de l'arbre. [10]

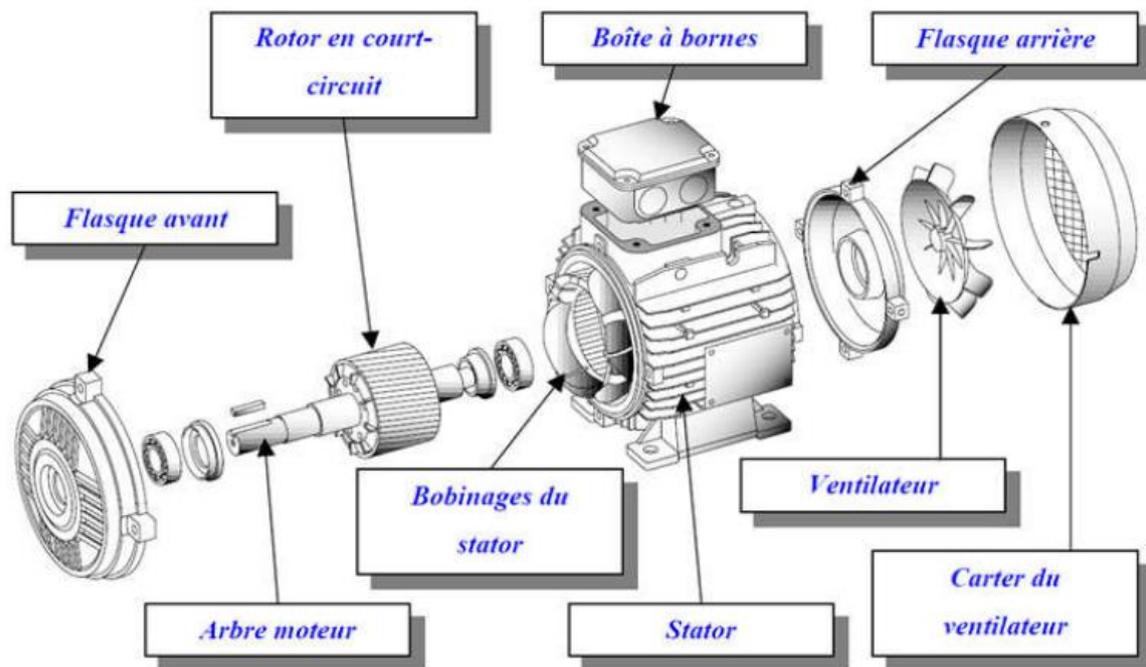


Figure II-5 Schéma désignant les éléments constituant une machine asynchrone

## II.2 Modélisation de la machine asynchrone triphasée (MAS)

Dans un premier lieu, on donnera de manière explicite le modèle mathématique de la machine asynchrone (Equations électriques et mécaniques) dans son référentiel triphasé. Puis, on réduira l'ordre du système par une transformation dite de PARK.

Cette transformation modélise la MAS dans un nouveau référentiel, biphasé cette fois. Dans un dernier lieu, on donnera la simulation numérique des différentes grandeurs de la MAS. [11]

La représentation de la machine asynchrone par des équations selon le système triphasé donne un modèle, dont les équations sont à coefficients variables en fonction du

temps .Dans le but de faciliter leur résolution, on a recours à une modélisation dite «transformation de Park», qui consiste à transformer le système triphasé en système à deux axes orthogonaux. L'élaboration d'une telle modélisation est indispensable pour l'étude du régime de contrôle du flux, de couple, de régulation de tension et de vitesse. [12]

## II.2.1 Equations électriques

### 2.1. a -Equations des tensions

Les équations de tension des trois phases statoriques :

$$V_{sa} = R_s i_{sa} + \frac{d\varphi_{sa}}{dt} \quad (\text{II.1})$$

$$V_{sb} = R_s i_{sb} + \frac{d\varphi_{sb}}{dt} \quad (\text{II.2})$$

$$V_{sc} = R_s i_{sc} + \frac{d\varphi_{sc}}{dt} \quad (\text{II.3})$$

Les équations de tension des trois phases rotoriques :

$$V_{ra} = R_r i_{ra} + \frac{d\varphi_{ra}}{dt} \quad (\text{II.4})$$

$$V_{rb} = R_r i_{rb} + \frac{d\varphi_{rb}}{dt} \quad (\text{II.5})$$

$$V_{rc} = R_r i_{rc} + \frac{d\varphi_{rc}}{dt} \quad (\text{II.6})$$

En désignant par:

$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$  : Tensions appliquées aux trois phases statoriques.

$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  : Courants qui traversent les trois phases statoriques.

$\varphi_{sa}, \varphi_{sb}, \varphi_{sc}$ : Flux totaux à travers ces enroulements.

$V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$ : Tensions rotoriques.

$i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}$ : Courants rotoriques .

$\varphi_{ra}, \varphi_{rb}, \varphi_{rc}$  : Flux rotoriques

$R_s$  : Résistance d'une phase statorique.

$R_r$  : Résistance d'une phase rotorique

Les équations de tension des trois phases statoriques et rotorique peuvent être écrites sous la forme matricielle suivante:

Pour le stator :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathcal{P}_{sa} \\ \mathcal{P}_{sb} \\ \mathcal{P}_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.7})$$

Ou sous la forme condensée comme suit :

$$[V_{s(a\ b\ c)}] = [R_s][i_{s(a\ b\ c)}] + \frac{d}{dt} [\mathcal{P}_{s(a\ b\ c)}] \quad (\text{II.8})$$

Pour le rotor:

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathcal{P}_{ra} \\ \mathcal{P}_{rb} \\ \mathcal{P}_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.9})$$

Ou sous la forme condensée comme suit :

$$[V_{r(a\ b\ c)}] = [R_r][i_{r(a\ b\ c)}] + \frac{d}{dt} [\mathcal{P}_{r(a\ b\ c)}] \quad (\text{II.10})$$

### 2.1. b -Equation magnétiques

Les hypothèses simplificatrices citées antérieurement conduisent à des relations linéaires entre les flux et les courants de la machine asynchrone, ces relations s'écrivent matriciellement comme suit :

Pour le stator:

$$\begin{bmatrix} \mathcal{P}_{sa} \\ \mathcal{P}_{sb} \\ \mathcal{P}_{sc} \end{bmatrix} = [L_s] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Pour le rotor :

$$\begin{bmatrix} \mathcal{P}_{ra} \\ \mathcal{P}_{rb} \\ \mathcal{P}_{rc} \end{bmatrix} = [L_r] \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + [M_{rs}] \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

$[L_s]$ : Matrice des inductances statoriques.

$[L_r]$ : Matrice des inductances rotoriques.

$[M_{sr}]$ : Matrice des inductances mutuelles statoriques.

$[M_{rs}]$  : Matrice des inductances mutuelles rotoriques.

$$[L_s] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

$$[L_r] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$

Ainsi :

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T = [M_0] = \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

$L_s$ : Inductance propre d'une phase statorique.

$L_r$  : Inductance propre d'une phase rotorique.

$M_s$ : Inductance mutuelle entre phases statoriques.

$M_r$  : Inductance mutuelle entre phases rotoriques.

$\theta$  : Angle électrique définit la position relative instantanée entre les axes statoriques et les axes rotoriques qui sont choisis comme axes des références.

$M$  : Maximum de l'inductance mutuelle entre phase du stator et la phase correspond du rotor.

### II.2.2 Equations mécaniques

L'étude des caractéristiques de la machine asynchrone fait introduire du variation non seulement des paramètres électriques (tension, courant, flux) mais aussi des paramètres mécaniques (couple, vitesse).

$$C_e = P [i_{s(a b c)}]^T \frac{d}{dt} [M_{sr}] [i_{r(a b c)}] \quad (\text{II.16})$$

Pour avoir un modèle complet de la machine il nécessite d'introduire l'équation du mouvement de la machine est exprimée comme suivant :

$$J \frac{d}{dt} \Omega_r = C_e - C_r - f \Omega_r \quad (\text{II.17})$$

Avec :

$J$  : Moment d'inertie des masses tournantes.

$C_r$  : Couple résistant imposé à l'arbre de la machine.

$\Omega_r$  : Vitesse rotorique.

$C_e$  : Couple électromagnétique.

$f$  : Coefficient de frottement visqueux.

### II.3 Transformation de Park

Cette conversion est appelée souvent transformation des axes.

Les coefficients des équations différentielles sont variables et la résolution analytique du système se heurte à des difficultés pratiquement insurmontables. Pour obtenir un système d'équations à coefficients constants, on transforme les enroulements statoriques et rotoriques en deux enroulements biphasés orthogonaux dq selon la transformation de PARK.

La figure (II.6) représente la transformation des enroulements réels abc en enroulements orthogonaux d-q

- ❖ Direct selon l'axe (d).
- ❖ Quadrature (transversal) selon l'axe (q).
- ❖ Homopolaire (o).

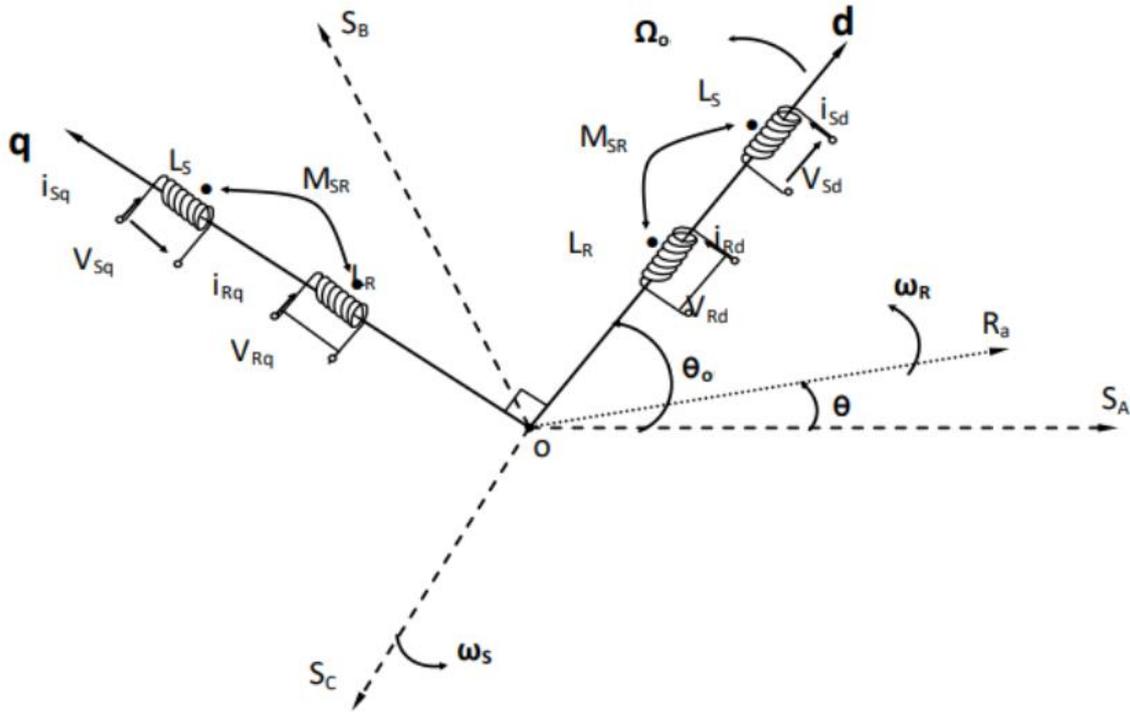


Figure II-6 Référentiel tournant d'axes (d- q)

### II.3.1 Equations électriques et magnétiques

#### 3.1. a- Equations des tensions

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathcal{P}_{sd} \\ \mathcal{P}_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_s \\ \omega_s & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{P}_{sq} \\ \mathcal{P}_{sd} \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathcal{P}_{rd} \\ \mathcal{P}_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -(\omega_s - \omega_r) \\ \omega_s - \omega_r & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{P}_{rq} \\ \mathcal{P}_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

#### 3.1. b- Equations magnétiques

$$\begin{bmatrix} \mathcal{P}_{sq} \\ \mathcal{P}_{sd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.20})$$

$$\begin{bmatrix} \mathcal{P}_{rq} \\ \mathcal{P}_{rd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M & 0 \\ 0 & M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

### 3.2- Equations mécaniques

Le couple électromécanique représenté dans l'équation :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\mathcal{P}_{rd} i_{sd} - \mathcal{P}_{rq} i_{sq}) \quad (\text{II.22})$$

L'équation de la vitesse mécanique est représentée par l'équation :

$$J \frac{d}{dt} \Omega_r = C_{em} - C_r - f \Omega_r \quad (\text{II.23})$$

#### II.4 Modélisation de l'ensemble moteur asynchrone- pompe

Le schéma de l'association moteur-pompe est montré sur la figure ci-dessous. Les entrées du modèle de la pompe sont : la vitesse du moteur, le couple électromagnétique et la hauteur de pompage (h). Les sorties sont : le débit et le couple résistant appliqué par la pompe.

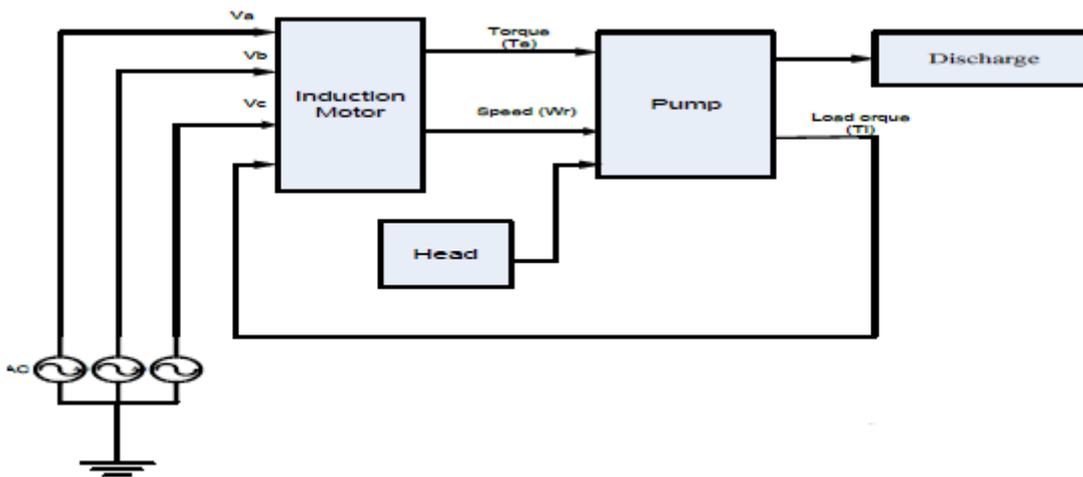


Figure II-7 schéma de l'association moteur-pompe

L'équation du mouvement de l'ensemble moteur-pompes peut être écrite comme suit :

$$J \frac{dw}{dt} = T_a - T_p = M_{mt} - (M_p + M_f) \quad (\text{II.24})$$

Avec :

J : le moment d'inertie.

$M_{mt}$  : Le couple électromagnétique développé par le moteur.

$M_p$  : Couple résistant dû à la pompe.

$M_f$  : Couple résistant dû au frottement visqueux.

$$M_f = k_f w$$

$k_f$  : Le coefficient de frottement.

Le couple résistant dû à la pompe est donné par l'expression suivante :

$$M_p = \frac{\rho g q h}{\tau_p w} \quad (\text{II.25})$$

Avec

$\rho$  : Densité volumique du liquide (1000 kg/m<sup>3</sup> pour l'eau).

$g$  : la gravité [m/s<sup>2</sup>]

$q$  : le débit de la pompe [m<sup>3</sup>/h]

$h$  : la hauteur [m]

$w$  : la vitesse du moteur.

$\tau_p$  : Le rendement de la pompe, représente le rapport entre la puissance reçue sur l'arbre de la pompe et la puissance fournie par le moteur.

Dans l'association du moteur à la pompe, un élément très important à considérer est la courbe caractéristique de la pompe. Cette caractéristique représente la variation de la hauteur de pompage ( $h$ ) en fonction du débit ( $q$ ). Cette courbe est fournie par le constructeur de la pompe.

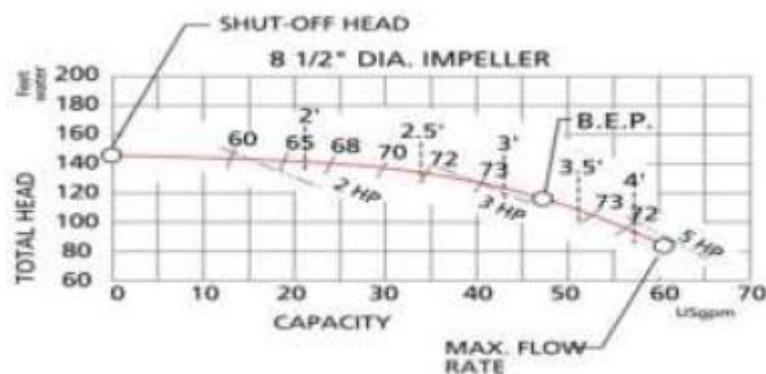


Figure II-8 courbe caractéristique d'une pompe

Cette courbe est caractérisée par trois points importants qui sont :

- Point de la hauteur maximale (shut-off head) : la hauteur maximale que la pompe peut atteindre et se produit à débit nul. Dans ce point la pompe consomme une faible énergie. Malheureusement dans ce point la pompe vibre et émet beaucoup de bruit.
- Le point à rendement maximal (best efficiency point BEP) : c'est le
- point où la pompe est plus efficace et fonctionne avec moins de vibrations et bruit. La pompe est conçue (dimensionnée) pour fonctionner à ce point.
- Le point de débit maximum (Max flow rate), la pompe peut ne pas fonctionner au-delà de ce point. La pompe sera bruyante et vibrera excessivement à ce point. La pompe consomme un maximum d'énergie à ce stade.

#### II.4.1 Commande de la pompe

Il existe deux stratégies pour la commande du fonctionnement du système moteur-pompe :

- La stratégie de commande à vitesse constante.
- La stratégie de commande à vitesse variable.

#### II.4.2 Commande à vitesse constante

Cette stratégie prescrit le fonctionnement de la pompe même si la pression chute au-dessous du point de fonctionnement en utilisant un interrupteur connecté à (to a header).

La pompe est entraînée par un moteur asynchrone alimenté par un système triphasé équilibré de pulsation.

$$\omega_e = 2\pi f$$

La vitesse de rotation est donnée par  $n_s = \frac{120 f}{P}$

#### II.4.3 Commande à vitesse variable

La commande à vitesse variable est une méthode de régulation des caractéristiques de la pompe en agissant sur la vitesse de rotation.

Les caractéristiques concernées sont : le débit (q) et la hauteur (h).

Pour une pompe centrifuge :

Débit :

$$\frac{q_1}{q_2} = \frac{n_1}{n_2}$$

Hauteur :

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$$

Puissance sur l'arbre :  $\frac{P_1}{P_2} = \frac{n_1}{n_2}$

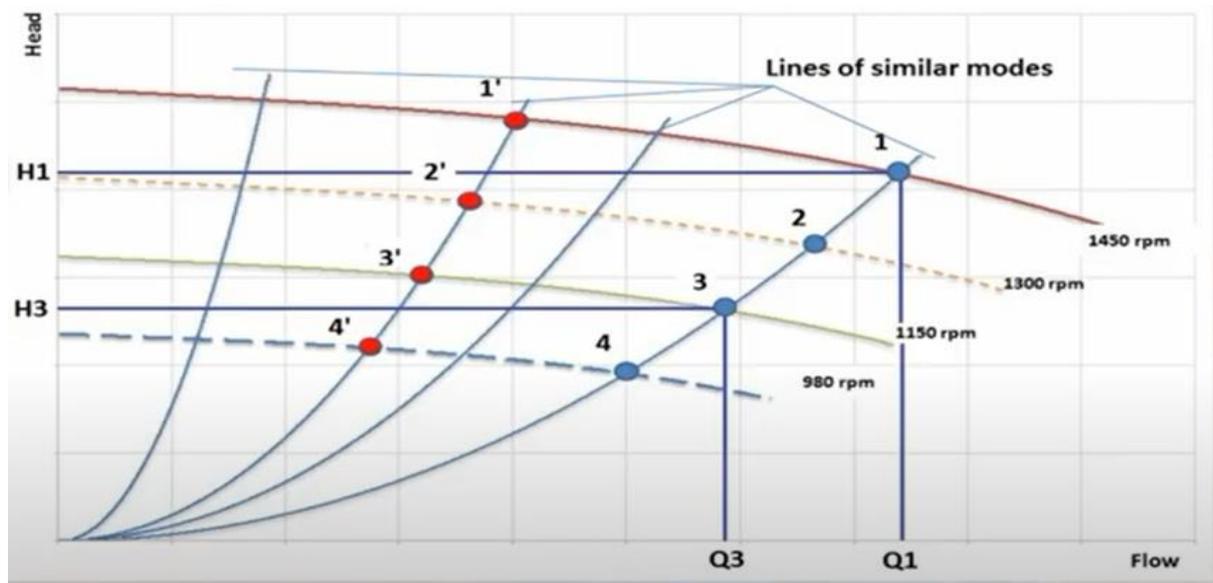


Figure II-9 Caractéristiques de la pompe pour différentes vitesses

Dans cette stratégie, la tension triphasée est appliquée au moteur à travers un entraînement à fréquences variables (variable frequency drive, VFD). Dans cette stratégie, la tension alternative est convertie en une tension continue utilisant un redresseur puis la tension continue est appliquée à un onduleur de tension. La sortie de l'onduleur est branchée aux trois phases de la machine asynchrone. La technique MLI triangulaire est utilisée pour générer les signaux de commande des thyristors constituant l'onduleur.

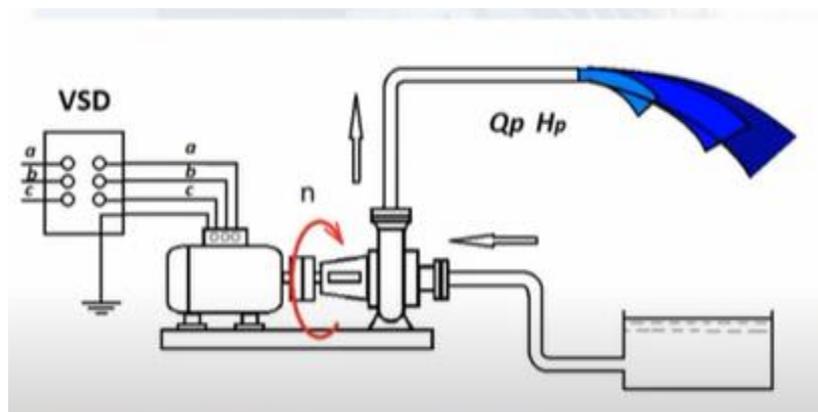


Figure II-10 Schéma entraînement à vitesse variable pour la commande du débit d'une pompe

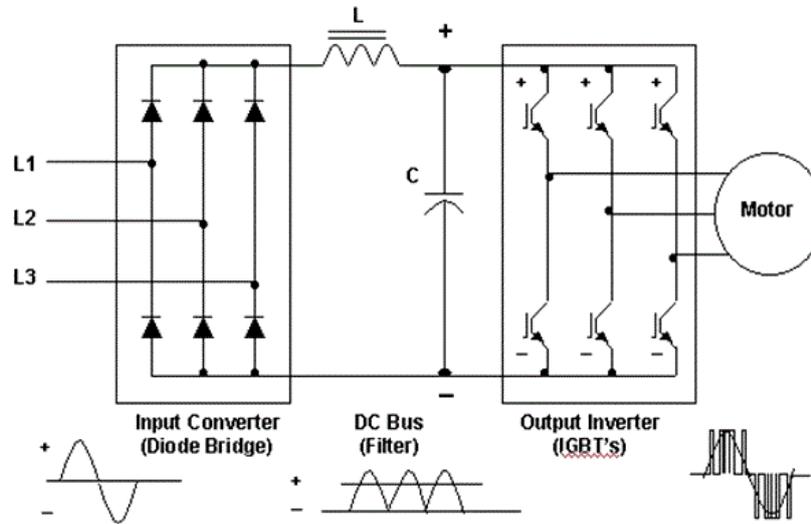


Figure II-11 schéma de l'association du moteur d'entraînement de la pompe aux convertisseurs

## CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté le modèle de l'ensemble pompe – moteur asynchrone.

Le choix du moteur asynchrone est justifié par les avantages multiples de ce moteur par rapport aux autres moteurs. Nous avons commencé par le modèle du moteur asynchrone puis le modèle de la pompe. La transformation de Park appliquée au moteur triphasé permet de simplifier l'étude. Le couple résistant dû à la pompe est ensuite calculé. Ce couple dépend du débit souhaité. L'installation d'une pompe dans une application nécessite la connaissance de ses caractéristiques. Ces caractéristiques fournies par le constructeur sont généralement portées sur une courbe caractéristique. C'est grâce à ces caractéristiques qu'on peut définir les performances du moteur d'entraînement.

## **Chapitre III. Fonctionnement de l'ensemble moteur- pompe en utilisant une commande tension-fréquence**

## INTRODUCTION

Le modèle complet du moteur avec la pompe est mis en œuvre dans ce chapitre. L'objectif c'est de calculer le débit de la pompe pour différentes valeurs de la hauteur de pompage (h).

Pour étudier l'influence du mode de démarrage du moteur asynchrone sur les caractéristiques de moteur lui-même et la pompe, nous avons implémenté dans matlab simulink la technique de commande de vitesse basée sur un rapport (Tension/fréquence, V/f control) constant.

### III.1 Commande v/f pour la variation de la vitesse d'un moteur asynchrone

La vitesse de rotation du moteur asynchrone est reliée à la vitesse de synchronisme par la relation :

$$n_r = (1 - s)n_s = (1 - s) \frac{120f}{P} \quad (\text{III.1})$$

Donc la commande de la vitesse du moteur peut être effectuée par la fréquence. Lorsque la fréquence augmente, la vitesse augmente et vice-versa.

D'un autre côté, la tension induite dans un moteur asynchrone est donnée par :

$$E_a = 4.44K_w \Phi N f \quad (\text{III.2})$$

Où :

$K_w$  : Le coefficient de bobinage

$\Phi$  : Le flux principal par pôle

$N$  : Le nombre de spires par phase

$f$  : La fréquence de la tension d'alimentation

La tension est proportionnelle à la tension induite, cela permet de considérer que :

$$V = 4.44K_w \Phi N f \quad (\text{III.3})$$

D'où, on peut extraire la relation du flux

$$\Phi = \frac{V}{4.44K_w N f} \quad (\text{III.4})$$

Le couple maximal d'un moteur asynchrone est donné par :

$$T_{max} = \frac{3}{w_s} \left[ \frac{V^2}{R_s \pm \sqrt{R_s^2 + (x_s + x_r)^2}} \right] = \frac{3}{Cf} \left[ \frac{V^2}{R_s \pm \sqrt{R_s^2 + (2\pi L_s f + 2\pi L_r f)^2}} \right] \quad (\text{III.5})$$

$$T_{max} = \frac{3}{Cf^2} \left[ \frac{V^2}{\frac{R_s}{f} \pm \sqrt{\left(\frac{R_s}{f}\right)^2 + 4\pi^2(L_s + L_r)^2}} \right]$$

$$T_{max} = \frac{3}{c} \frac{\left(\frac{V}{f}\right)^2}{\frac{R_s}{f} \pm \sqrt{\left(\frac{R_s}{f}\right)^2 + 4\pi^2(L_s + L_r)^2}}$$

La résistance statorique  $R_s$  est généralement négligeable devant la fréquence  $f$ , donc le terme  $\frac{R_s}{f}$  peut être négligé dans l'équation du couple. Cette équation devient comme suit :

$$T_{max} = \pm K \frac{\left(\frac{V}{f}\right)^2}{\pm \sqrt{4\pi^2(L_s + L_r)^2}} = \pm K \frac{\left(\frac{V}{f}\right)^2}{2\pi(L_s + L_r)} \quad (\text{III.6})$$

A partir de cette dernière expression du couple, on remarque que lorsque la fréquence augmente pour augmenter la vitesse, le couple maximal va diminuer.

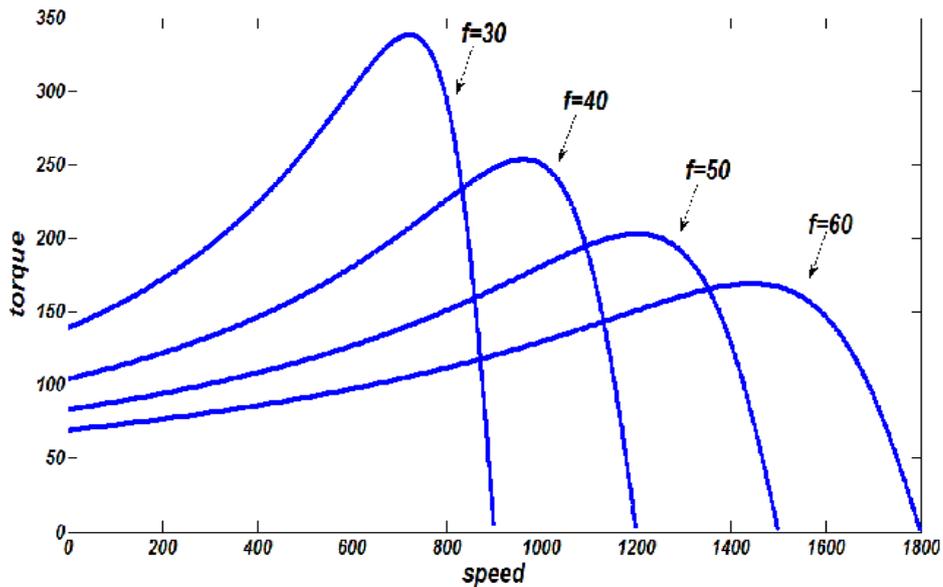


Figure III-1 Caractéristique couple vitesse du moteur

Par contre si la fréquence diminue pour diminuer la vitesse, le flux augmente. Cela conduit à deux problèmes.

Le premier c'est le risque de saturation.

Le deuxième, c'est que le courant dans les bobines augmente et par conséquent l'échauffement du bobinage est inévitable.

La commande (V/f) (voltage frequency control) consiste à faire varier la fréquence et la tension d'alimentation de telle façon que le rapport (v/f) reste constant. Cela permet de maintenir le flux constant et par conséquent le couple.

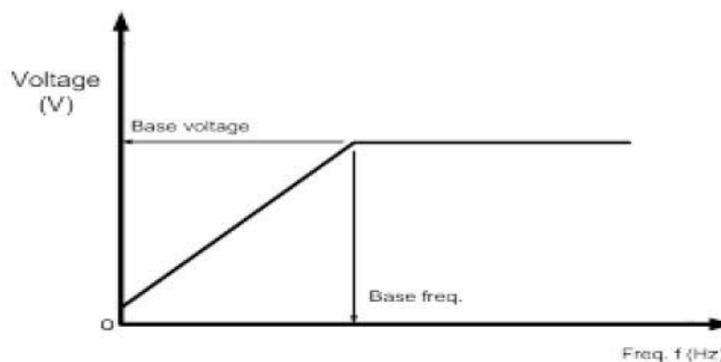


Figure III-2 caractéristique tension/fréquence pour une commande (v/f)

D'après la figure (III.3), cette méthode permet de garder un rapport  $(v/f)$  constant dans la plage de fréquence allant de zéro jusqu'à la fréquence de base (60 Hz). Cela permet de varier la vitesse de rotation de zéro jusqu'à la vitesse nominale. Au-delà de la fréquence de base, la tension devient constante et l'augmentation de la fréquence conduira la diminution du couple maximal ce qui influe sur les performances du moteur (voir figure (III.3)).

Pour l'ensemble moteur- pompe et vu le démarrage et l'arrêt fréquents des pompes, cette technique semble être convenable pendant la période de démarrage.

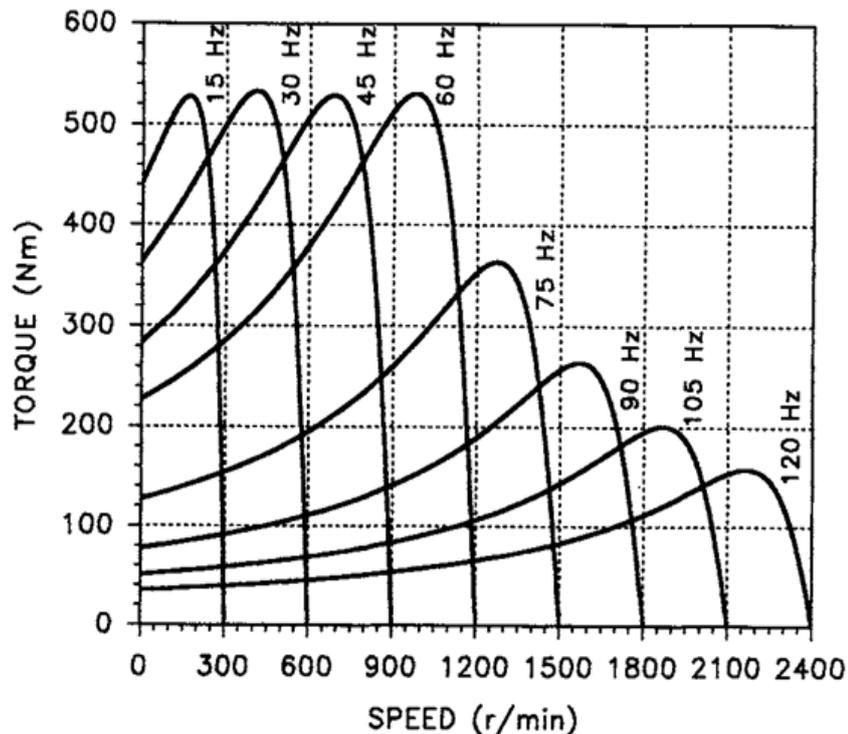


Figure III-3 caractéristique couple vitesse pour commande par le rapport  $(v/f)$  constant

### III.2 Association moteur pompe sans la commande $(V/f)$

Dans cette section, nous avons implémenté le modèle du moteur-pompe dans Matlab-Simulink. Les équations du modèle sont décrites dans le chapitre 2.

Le moteur asynchrone est alimenté directement à partir d'un réseau triphasé.

Les caractéristiques du moteur sont les suivants :

Puissance nominale : 5.4 hp

Nombre de pôles : 4

Résistance du stator : 1.4  $\Omega$

Inductance du stator : 5.8 mH

Résistance du rotor : 1.59  $\Omega$

Inductance du rotor : 5.8 mH

Inductance mutuelle : 172 mH

Inertie : 0.0131 Kg.m<sup>2</sup>

Le schéma du modèle implémenté dans Matlab-simulink est montré sur la figure (III.4) :

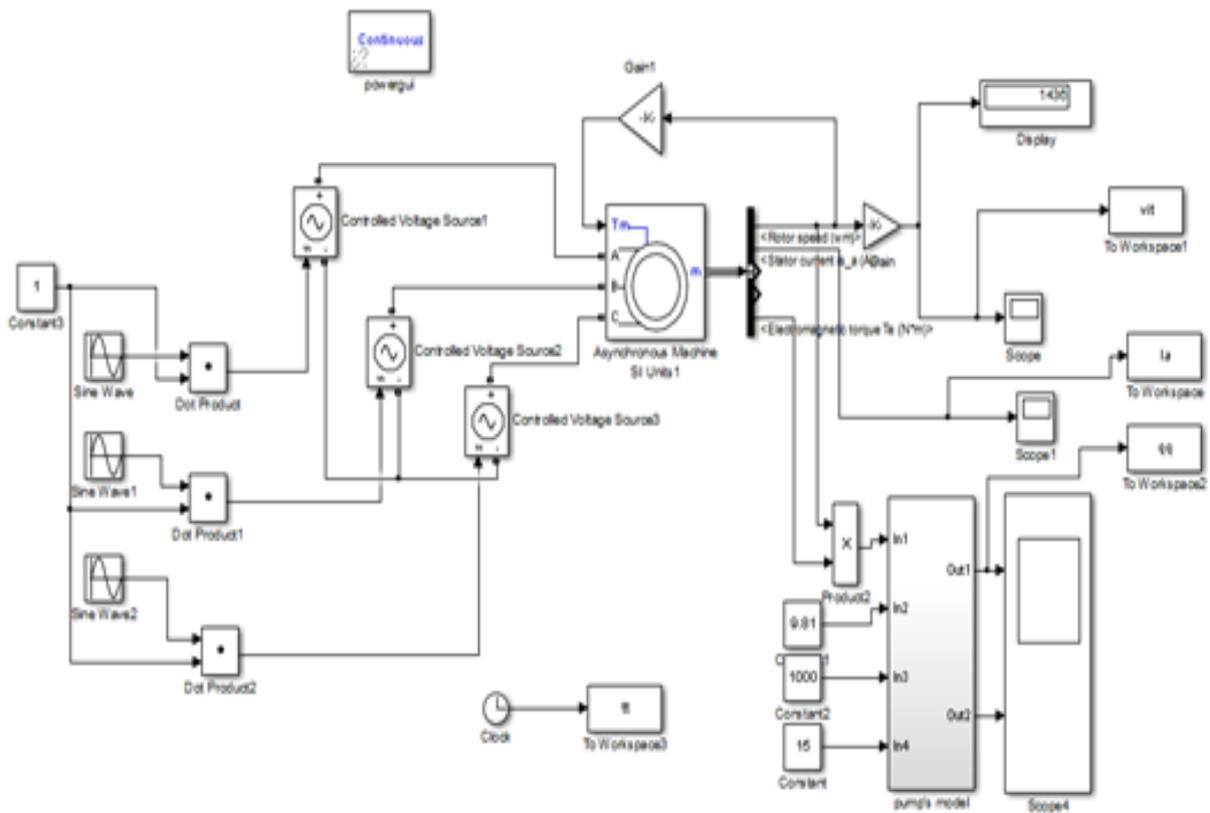
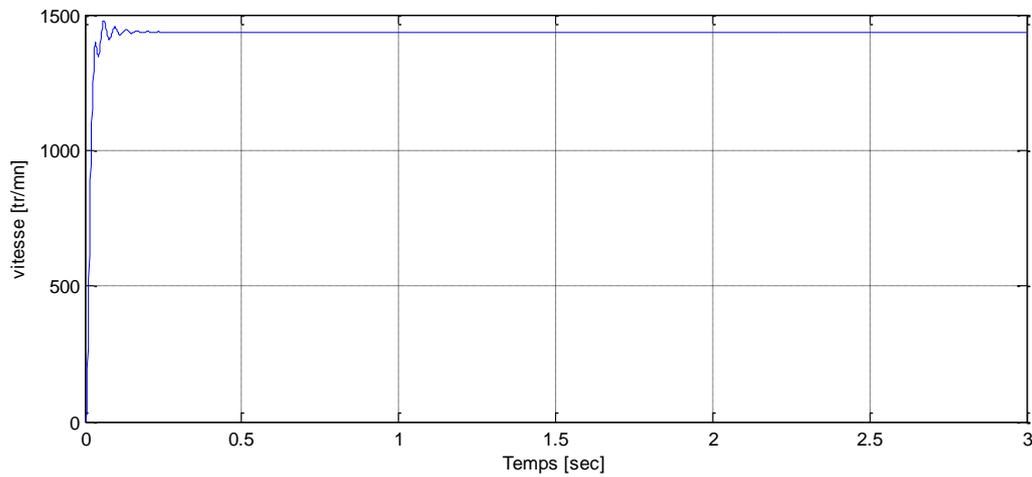
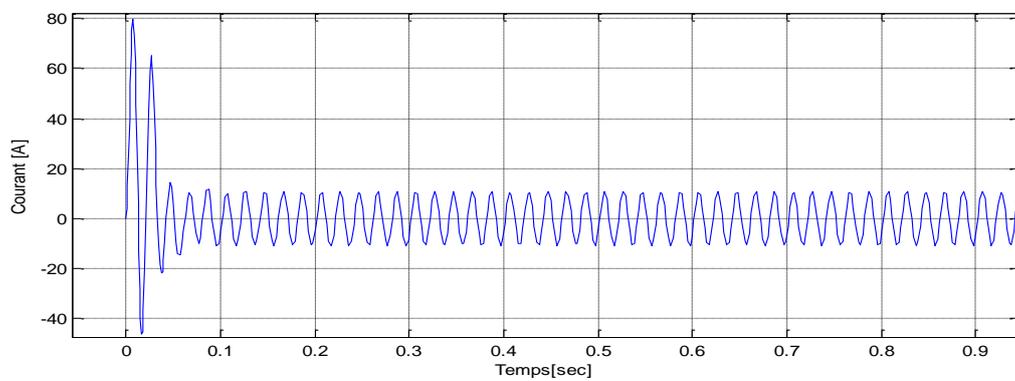


Figure III-4 Schéma du modèle moteur-pompe implémenté dans Matlab-Simulink

Les résultats de simulation sont montrés sur les figures ci-dessous :



*Figure III-5 vitesse du moteur asynchrone en fonction du temps*



*Figure III-6 Courant de la phase A du stator en fonction du temps*

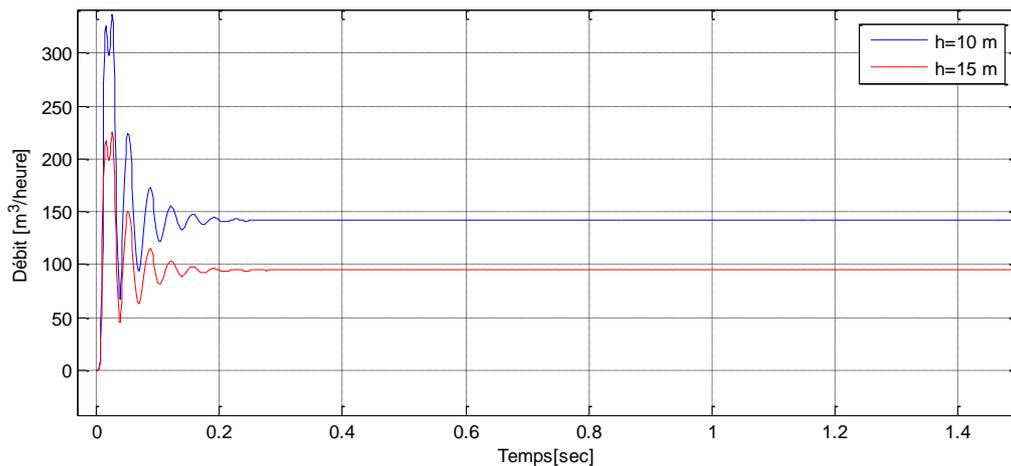


Figure III-7 Débit de la pompe en fonction du temps pour deux valeurs de la hauteur  $h$

De ces figures on peut faire les remarques suivantes :

- Le moteur accélère pour atteindre la vitesse de rotation en régime permanent. Cette vitesse correspond à la charge appliquée (voir figure (III.5)).
- A partir de la figure (III.6), Le courant absorbé par la phase augmente au démarrage et atteindre huit (8) le courant du régime permanent. Cela peut être dangereux pour le moteur sachant que ce dernier est couplé à une pompe où le démarrage est fréquent.
- Le débit de la pompe montré sur la figure (III.7) augmente aussi pour atteindre la valeur constante du régime permanent. Malheureusement au démarrage ce débit atteint des valeurs importantes qui peuvent être dangereuse pour la pompe.
- Le débit diminue lorsque la hauteur du pompage augmente. Cela correspond bien à la courbe caractéristique de la pompe.

### III.3 Association moteur pompe avec la commande (V/f)

Dans cette partie et au lieu d'alimenter le moteur directement à partir d'une source triphasé, nous avons effectué un démarrage (accélération du moteur de zéro jusqu'à la vitesse du régime permanent) en assurant un rapport (v/f) constant. De plus le moteur est alimenté à travers un onduleur (C/AC convertie). Une commande MLI triangulaire est implémente aussi pour générer les signaux de commande du convertisseur.

Le modèle complet est montré sur la figure (III.8) :

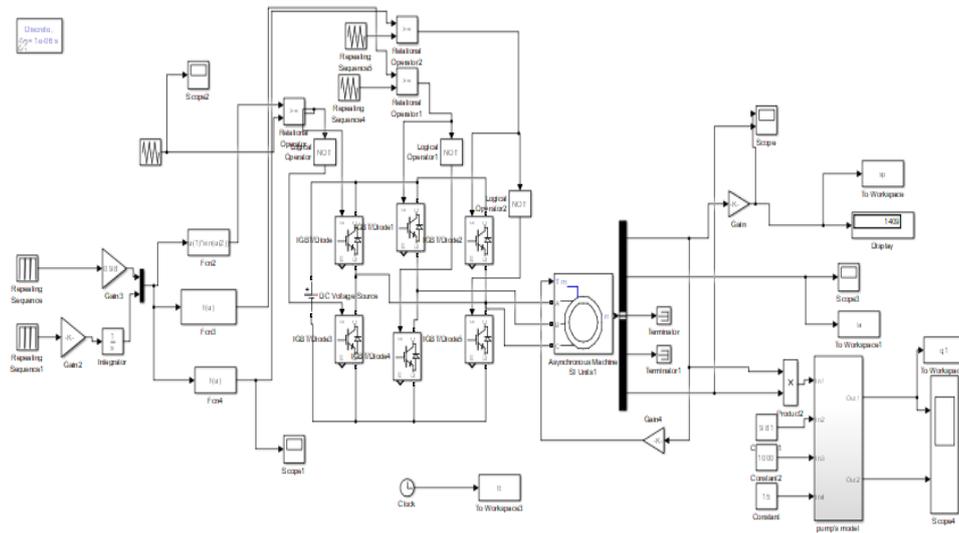


Figure III-8 Modèle Matlab-Simulink de l'ensemble moteur-pompe avec la commande (v/f)

Les résultats de simulation par ce deuxième modèle sont montrés sur les figures ci-dessous.

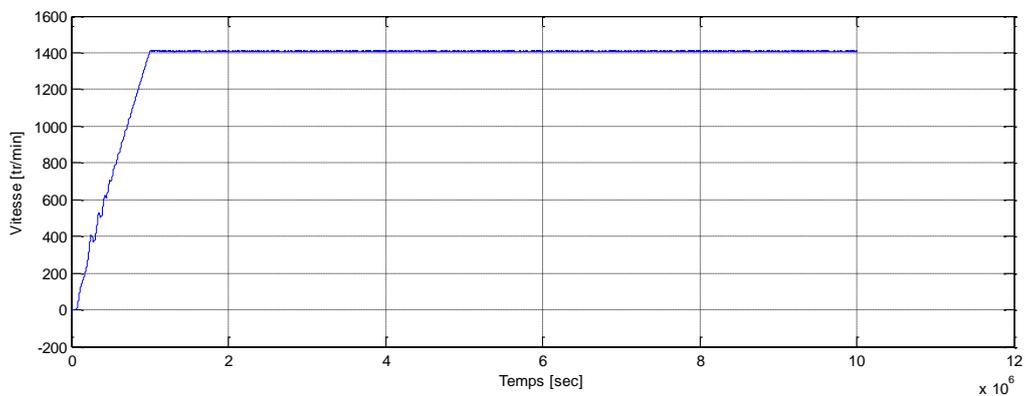


Figure III-9 Vitesse de la rotation du moteur

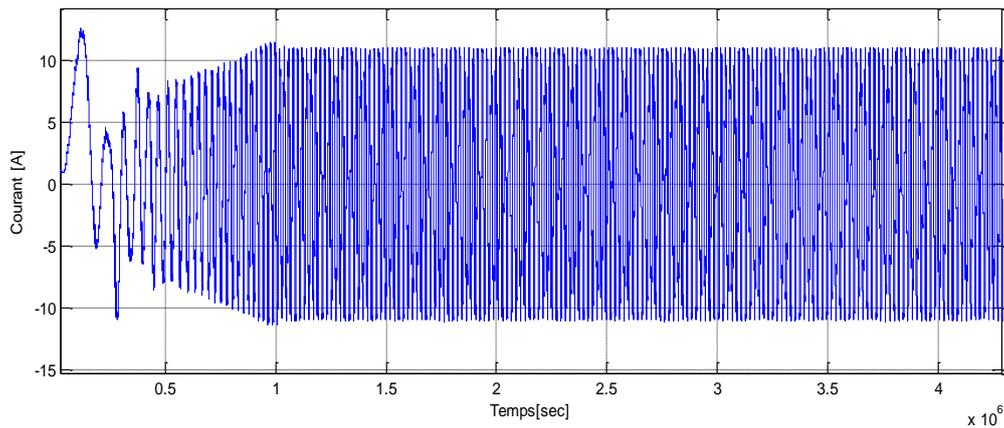


Figure III-10 Courant dans la phase A en fonction de temps

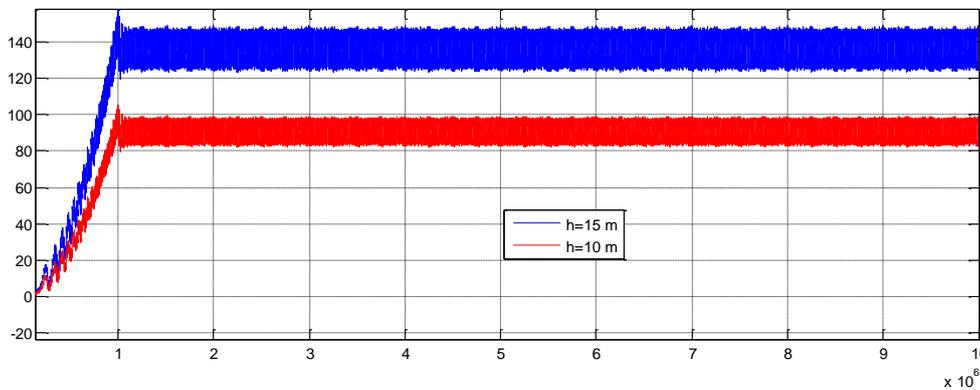


Figure III-11 Débit de la pompe en fonction du temps pour deux valeurs de la hauteur  $h$

A partir de ces figures, on peut faire les remarques suivantes :

- La vitesse du moteur augmente pour atteindre la vitesse du régime permanent. Par comparaison avec la courbe de la vitesse (III.5), on remarque que l'augmentation de la vitesse est souple pendant le régime transitoire. De plus on ne remarque aucun dépassement par rapport à la vitesse du régime permanent.
- Pour la courbe de courant et contrairement au premier cas, les valeurs du courant pendant le démarrage sont très acceptables. Cela montre que cette technique de commande est convenable pour des moteurs à démarrage fréquent.
- Pour le débit, on remarque que le débit de la pompe atteint la valeur du régime permanent sans avoir de dépassement ce qui est bien pour cette technique. Malheureusement et vu la commutation entre phase au niveau du convertisseur, la vitesse de rotation, le couple et le courant de phase contiennent beaucoup d'harmoniques et cela se répercute sur la valeur du débit qui est fortement oscillatoire.

## CONCLUSION

Dans ce chapitre, le modèle complet de l'ensemble moteur- pompe a été implémenté dans Matlab-Simulink.

Deux applications ont été réalisées. Dans la première, le moteur est alimenté directement à partir d'une source triphasée tandis que dans la deuxième, il est alimenté à travers un onduleur et en utilisant une commande avec un rapport V/f (tension/ fréquence) constant. La comparaison des résultats montre de bonnes performances dynamiques du moteur en utilisant une commande (V/f) constant. Cela est convenable pour les applications du pompage caractérisées par un processus (arrêt/redémarrage) fréquent.

# **CONCLUSION GENERALE**

## CONCLUSION GENERALE

Dans ce mémoire de Master nous avons abordé un sujet d'une importance particulière dans les systèmes électromécaniques. Il s'agit du pompage. Cette fonction est présente dans presque tout système industriel. Elle permet de véhiculer un liquide d'un niveau à un autre.

L'application la plus connue est le pompage de l'eau.

Dans le premier chapitre nous présentés les pompes de façon générale. L'accent est mis particulièrement sur leur principe de fonctionnement ainsi que les différents types. Nous avons présenté dans cette partie aussi un calcul qui permet de partir des paramètres de l'installation du pompage et le débit désiré de définir les caractéristiques du moteur d'entraînement.

Dans la deuxième partie de ce mémoire, nous avons présenté le modèle de l'ensemble moteur asynchrone pompe. Après une brève description du moteur asynchrone, les équations qui régissent le fonctionnement du moteur ont été présentées. Ensuite nous avons abordé les équations de la pompe. Les grandeurs d'entrée du modèle de la pompe sont : le couple du moteur, la vitesse de rotation ainsi que la hauteur de pompage. Les sorties sont : le débit de la pompe et le couple résistant appliqué au moteur. Une pompe est définie par une courbe caractéristique qui représente la variation de la hauteur de pompage en fonction du débit de la pompe. Dans cette partie nous avons discuté les points caractéristiques de cette courbe. La bonne lecture de cette courbe permet une exploitation optimale de la pompe.

Dans la dernière partie de ce mémoire, nous avons implémenté dans Matlab simulink le modèle complet de la pompe associée au moteur. Afin d'améliorer les performances de la pompe, nous avons proposé de commander le moteur pendant le démarrage en utilisant la technique (tension fréquence). Cette technique consiste à maintenir le rapport tension fréquence constant pour une plage de fréquence allant de zéro jusqu'à la fréquence de base. Cela permet d'éviter les valeurs excessives du courant et débit pendant la phase de démarrage. Cela est convenable pour une pompe où l'arrêt et le redémarrage sont généralement fréquents.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

- 
- [1] Ivantysyn, J., and Ivantysynova, M., 2001, "Hydrostatic Pumps and Motors", Academic Books International, New Delhi.
- [2] Williamson, C., Zimmerman, J., and Ivantysynova, M., 2008, "Efficiency Study of an Excavator Hydraulic System Based on Displacement-Controlled Actuators," Proceedings of the Bath/ASME Symposium on Fluid Power and Motion Control.
- [3] [https://www.gunt.de/images/download/Connaissances-de-base-en-pompes-centrifuges\\_french.pdf](https://www.gunt.de/images/download/Connaissances-de-base-en-pompes-centrifuges_french.pdf).
- [4] AMINE BELAID, ETUDE ET CONCEPTION D'UNE POMPE CENTRIFUGE, mémoire de master en génie mécanique, option conception mécanique et productique, université Mohammed Khidher de Biskra 2017.
- [5] <https://docplayer.fr/202563915-Etude-du-regime-rationnel-de-fonctionnement-d-une-pompe-centrifuge-avec-vitesse-variable-par-mli.html>.
- [6] Formation TOTAL: MAINTENANCE MECANIQUE LES POMPES Manuel de formation EXP-MN-SE090-FRDernière révision: 26/11/2008.
- [7] Cherier.F, Amade. G, « Modélisation en vue du diagnostic des défauts dans une machine asynchrone » mémoire d'Ingénieur d'Etat, Université M'Hamed Bougara-Boumerdès, 2009.
- [8] Luc Lasne, Notions de base et machine électrique, Dunod, Paris, 2005.
- [9] E. Gaucheron, «Les moteurs électriques... pour mieux les piloter et les protéger», <http://www.schneider-electric.com>, avril 2018.
- [10] Cherier.F, Amade. G, « Modélisation en vue du diagnostic des défauts dans une machine asynchrone » mémoire d'Ingénieur d'Etat, Université M'hamed Bougara-Boumerdès, 2009

[11] Lamine M, Traoré. A, "Modélisation et simulation d'une machine asynchrone à cage à l'aide du logiciel Matlab/Simulink «, msas\_pp038\_45.

[12] G. Brahim," Commande non linéaire de la machine à induction ", memoire de master, Université de Batna, 2012.

---

## نمدجة للمضخات التي تعمل بمحرك لا تزامني ثلاثي الاطوار

تستخدم المضخات التي تعمل بمحركات كهربائية على نطاق واسع في الحياة اليومية وكذلك في المجال الصناعي. إنها عناصر أساسية لنقل سائل أو الموائع من مستوى إلى آخر. في هذا العمل قمنا بنمذجة المجموعة مضخة -المحرك اللاتزامني. الهدف هو دراسة تأثير الأداء الديناميكي للمحرك على المقادير المميزة للضخ. التحكم بمقدار (توتر/تواتر) ثابت يسمح بتحسين أداء المحرك خاصة خلال الانطلاق. هذه الخاصية تلائم جيدا تطبيقات الضخ التي غالبا ما تشهد توقف وانطلاق من جديد لنظام الضخ.

---

## Modélisation des pompes entraînées par des moteurs asynchrones

Pompes entraînées par les moteurs électriques sont largement utilisées dans vie quotidien aussi bien dans le domaine industrielle. C'est des éléments essentiels pour véhiculer un liquide ou un fluide d'un niveau à autre.

Dans ce travail nous avons modélisé l'ensemble moteur asynchrone- pompe. L'objectif est d'étudier l'influence des performances dynamique du moteur sur les grandeurs caractéristiques du pompage.

Une commande avec un rapport (V/f) constant permet d'améliorer les performances du moteur au démarrage. Cela est convenable pour des applications de pompage où le démarrage est généralement fréquent.

---

## Modelling of pumps driven by induction motors

Pumps driven by electric motors are widely used in daily life as well as in the industrial field. They are essential elements to move a liquid or a fluid from one level to another.

In this work, we have modeled the induction motor-pump assembly. The objective is to study the influence of the dynamic performance of the motor on the characteristic quantities of pumping.

Control with a constant (V/f) ratio improves motor performance on starting. This is suitable for pumping applications where starting is usually frequent.