

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement Supérieur  
et de la Recherche scientifique  
Université Echahid Hamma Lakhdar d'Et-Oued



Faculté de Technologie

Mémoire de Fin d'Études

En vue de l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Faculté de la Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Commande Electriques

## Thème

*Surveillance et diagnostic d'une pompe centrifuge de la station de déminéralisation d'eau salée d'El Oued*

**Présenté par :**

- Mr. Hamdi Karim
- Mr. Guessouma Sofiane
- Mr. Gheraissa Imad Din
- Mr. Fethiza ammar Ibrahim

**Encadreur : Dr. Tir Zoheir**

**Professeur à l'université d'El oued**

**Année universitaire: 2020/2021**

Mémoire préparé au sein du Laboratoire d'Exploitation et de Valorisation des Ressources Energétiques

Saharie

# **DEDICACES**

***A ma tendre mère et mon très cher père***

***Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point vous remercier  
comme il se doit. Votre bienveillance me guide et vos  
encouragements ont toujours été ma source de force.  
Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.***

***A ma très chère femme***

***Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager  
Tu m'as toujours aidé et supporté au moment difficile.***

***Puisse Dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout te  
garder pour moi et pour nos filles comme tu l'étais toujours pour le  
meilleur et pour le pire***

***A mes filles***

***A mes chers frères et ma très chère sœur***

***A mes proches et à la famille Kholladi***

***Au Dr.Labbi Yacine et Dr.Kholladi Najoua qui ont beaucoup  
contribués pour mon retour aux études universitaires après des  
années de rupture***

***A tous les voisins et tous les amis que j'ai connu jusqu'à  
maintenant.***

## Remerciements

Nous remercions avant tout le dieu, le tout-puissant, de nous avoir accordé parmi ses innombrables grâces, santé et courage pour accomplir ce travail.

Nous exprimons nos profonds remerciements à notre enseignant et encadreur, le professeur TIR Zoheir pour sa disponibilité, son accueil et les aides compétentes qu'il nous a apporté.

Nos remerciements au directeur du laboratoire d'exploitation et de valorisation des ressources énergétique saharienne LEVRES de l'université d'El Oued.

Nos vifs remerciements aux membres jury Dr. Cherif Hakima d'avoir pris du temps pour examiner notre thèse et au président du jury Dr. Kechida Ridha pour l'honneur qu'il nous a fait d'avoir accepté la présidence de jury de soutenance.

# Table des matières

<b>Table des matières</b> .....	<b>iv</b>
<b>Liste des figures</b> .....	<b>vi</b>
<b>Liste des tables</b> .....	<b>vii</b>
<b>Liste des symboles et abréviations</b> .....	<b>viii</b>
<b>Résumé</b> .....	<b>x</b>
<b>Introduction général</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I Généralité</b> .....	<b>3</b>
<b>I.1 Introduction:</b> .....	<b>4</b>
<b>I.2 Présentation de l'unité de déminéralisation de l'eau salée :</b> .....	<b>4</b>
I.2.1 Station de l'eau brute: .....	4
I.2.2 Station de filtration sur sable : .....	5
I.2.3 Station d'osmose inverse .....	6
I.2.4 Station d'évacuation de rejet : .....	7
I.2.5 Station d'eau traitée : .....	8
<b>I.3 Rappel sur les pompes centrifuges :</b> .....	<b>8</b>
I.3.1 Définition: .....	8
I.3.2 Principe de fonctionnement d'une pompe centrifugeuse : .....	9
I.3.3 Découpe d'une pompe centrifuge .....	10
<b>I.4 Calcul des Propriétés général d'une pompe centrifuges :</b> .....	<b>10</b>
I.4.1 Calcul de la hauteur manométrique totale : .....	11
I.4.2 Calcul de la puissance hydraulique .....	12
I.4.3 Calcul du rendement : .....	13
I.4.4 Calcul de NPSHd (Net Positive Suction Height) : .....	13
<b>I.5 Présentation des défauts des pompes centrifugeuses:</b> .....	<b>14</b>
I.5.1 Fuite affectant une garniture d'étanchéité d'arbre : .....	14
I.5.2 Point de fonctionnement : .....	14
I.5.3 Cavitation : .....	14
I.5.4 Pièces d'origine incertaine : .....	15
I.5.5 Sélection erronée des matériaux : .....	15
I.5.6 Présence d'air : .....	15
I.5.7 Contraintes mécaniques : .....	15
I.5.8 Rotation à sec, gel et circulation : .....	15

I.5.9	Maintenance négligée: .....	16
I.5.10	Mauvais alignement : .....	16
<b>I.6</b>	<b>Conclusion :</b> .....	<b>16</b>
	<b>Chapitre II Présentation des techniques de diagnostics utilisée .....</b>	<b>17</b>
<b>II.1</b>	<b>Introduction .....</b>	<b>18</b>
<b>II.2</b>	<b>Classement des techniques de diagnostics :.....</b>	<b>18</b>
II.2.1	Les techniques de redondance Matérielle: .....	18
II.2.2	Les techniques des modèles (redondance analytique): .....	18
II.2.3	Les techniques des signaux: .....	19
<b>II.3</b>	<b>Technique d'analyse du courant du moteur (MCA) :.....</b>	<b>19</b>
II.3.1	Rappel sur la transformé de fourrier discret (DFT) et rapide (FFT) : .....	19
II.3.2	Justification du choix de la technique MCA: .....	22
II.3.3	Résumé de la technique :.....	22
II.3.4	Inconvénient de la technique MCA :.....	23
<b>II.4</b>	<b>Technique des formes Lissajous du vecteur de Park :.....</b>	<b>23</b>
II.4.1	Justification du choix de cette technique : .....	23
II.4.2	Résumé de la technique:.....	24
II.4.3	Rappel sur la transformation de Park: .....	24
II.4.4	Rappel sur la méthode conventionnel visuelle des formes de Lissajous: .....	24
II.4.5	Présentation de l'extracteur de critère utilisé : .....	25
II.4.6	Présentation des défauts en relation avec le critère de fraction : .....	26
<b>II.5</b>	<b>Conclusion :</b> .....	<b>27</b>
	<b>Chapitre III Etude expérimentale .....</b>	<b>28</b>
<b>III.1</b>	<b>Introduction : .....</b>	<b>29</b>
<b>III.2</b>	<b>Description du banc d'essai :.....</b>	<b>29</b>
<b>III.3</b>	<b>Technique de l'analyse du courant du moteur MCA:.....</b>	<b>30</b>
<b>III.4</b>	<b>Diagnostic électrique des formes de Lissajous du vecteur de Park :.....</b>	<b>34</b>
<b>III.5</b>	<b>Conclusion :.....</b>	<b>36</b>
	<b>Conclusion général .....</b>	<b>37</b>
	<b>Conclusion général : .....</b>	<b>38</b>
	<b>Annexes.....</b>	<b>39</b>
	<b>Fiche technique d'une pompe KSB de l'unité de déminéralisation .....</b>	<b>40</b>
	<b>Table de calcul des parte de charge :.....</b>	<b>41</b>

## Liste des figures

Figure I.1 : Vue globale de la station d'eau brute [2].....	4
Figure I.2 Station de filtre à sable [2].....	5
Figure I.3: Station d'osmose inverse [2] .....	6
Figure I.4 : Station de rejet [2] .....	7
Figure I.5 : Station d'eau traitée [2] .....	8
Figure I.6: Pompe KSB de l'station de déminéralisation d'eau salée de la société ADE [2].....	8
Figure I.7 : Coupe latéral d'une pompe centrifuge.....	9
Figure I.8 : Découpage d'une pompe centrifuge industrielle [4] .....	10
Figure I.9 Illustration des hauteurs propre d'une pompe.....	11
Figure I.10 : Courbe caractéristique d'une pompe centrifuge [5] .....	12
Figure II.1 : Données des échantillonnées pour la transformée de Fourier discrète. [13].....	20
Figure II.2 : Les étapes du flux du travail de la technique MCA [14] .....	22
Figure II.3 : Spectre de défaut d'une machine asynchrone avec désalignement [15] .....	23
Figure II.4 : Forme de Lissajous des courant de Park [16] .....	25
Figure II.5 : Etapes de la technique des formes de Lissajous du vecteur de Park [16] .....	27
Figure III.1 : Banc d'essais au niveau du laboratoire LEVRES .....	29
Figure III.2: Spectre d'une pompe en bonne état.....	30
Figure III.3 : Spectre du ratio pour un cas d'un défaut.....	31
Figure III.4 : Spectre du défaut d'obturation partielle.....	31
Figure III.5 : Spectre du défaut d'obturation totale .....	31
Figure III.6 Spectre du défaut sans charge .....	31
Figure III.7 : Spectre du défaut marche à sec .....	31
Figure III.8 : Spectre du défaut de désalignement.....	32
Figure III.9 : spectre de 80 à 200 Hertz défaut obturation partielle .....	32
Figure III.10 : spectre de 80 à 200 Hertz défaut obturation totale.....	32
Figure III.11 : spectre de 80 à 200 Hertz défaut marche sans charge.....	33
Figure III.12 : spectre de 80 à 200 Hertz défaut de marche à sec .....	33
Figure III.13 : spectre de 80 à 200 Hertz défaut de désalignement .....	33
Figure III.14 : Forme de Lissajous de la pompe en bonne état .....	34
Figure III.15 : Forme de Lissajous du Vecteur Park pour Défaut de d'obturation partielle ....	34
Figure III.16 : Forme de Lissajous du Vecteur Park pour Défaut d'obturation total .....	34
Figure III.17 : Forme de Lissajous du Vecteur Park pour Défaut de marche sans charge.....	34
Figure III.18: Forme de Lissajous du Vecteur Park pour Défaut marche à sec .....	34
Figure III.19: Forme de Lissajous du Vecteur Park pour Défaut désalignement.....	35
Figure A.1 : Fiche technique Pompe KSB de la station de déminéralisation d'eau sal [3].....	40

## Liste des tables

Table I.1 : Répartition des causes de panne des pompes centrifuge [9] .....	14
Table II.1 : Défauts résultants avec la technique des formes Lissajous [16].....	26
Table III.1 : Facteur de fraction en relation avec les défauts .....	35
Table A.1 : Perte des charges d'une pompe centrifuge .....	41

## Liste des symboles et abréviations

<u><b>Symbole</b></u>	<u><b>Explication</b></u>
<i>ADE</i>	Algérienne des Eau
<i>HMI</i>	Interface Homme Machine
<i>SCADA</i>	Système de supervision centralisé de la station
<i>NPSH</i>	Net Positive Section Head (en bar)
<i>HMT</i>	Hauteur Manométrique Total (en mètre colonne d'eau)
<i>Ha</i>	hauteur manométrique d'aspiration (en mètre)
<i>Hr</i>	hauteur de refoulement (en mètre)
<i>Pc</i>	pertes de charges moyennes (en mètre colonne d'eau)
<i>Pr</i>	pression de refoulement souhaitée à l'ouverture du robinet (en mce)
$\Delta p$	différence de pression entre l'aspiration et le refoulement (en mce)
<i>Q</i>	débit volumique (en litre par seconde)
$\eta$	rendement
<i>P<sub>h</sub></i>	la puissance hydraulique (en Watt)
<i>P<sub>p</sub></i>	la puissance prélevée de la plaque signalétique (en Watt)
<i>NPSH<sub>d</sub></i>	pression positive nette disponible à l'entrée de la pompe (en bar)
<i>P<sub>atm</sub></i>	pression atmosphérique (en bar)
<i>P<sub>vs</sub></i>	pression de vapeur saturante du fluide (en bar)
<i>J<sub>asp</sub></i>	Perte de charge à l'aspiration (en mce)
<i>Hh</i>	Hauteur hydraulique à l'entrée de la pompe (négative en cas de pompe sous charge)
<i>NPSH<sub>r</sub></i>	NPSH requis (en bar)
<i>n<sub>s</sub></i>	Vitesse de synchronisme ou vitesse du champ tournant (rad/s)
<i>P</i>	nombre de pair de pôles
<i>n<sub>r</sub></i>	vitesse du rotor en (rad/s)
<i>KSB</i>	Fournisseur principal de pompe de la station de déminéralisation
<i>d</i>	Axe direct
<i>q</i>	Axe Quadratique
<i>i<sub>sa</sub>, i<sub>sb</sub>, i<sub>sc</sub></i>	les courants du stator de moteur (en Ampère)
<i>i<sub>sd</sub></i>	La composante d'axe directe du vecteur de Park (en Ampère)
<i>i<sub>sq</sub></i>	La composante d'axe quadratique du vecteur de Park (en Ampère)

<b><i>mdq</i></b>	La moyenne des distances des points des formes de Lissajous (en A)
<b><i>d<sub>k</sub></i></b>	Les échantillons du courant de la phase d
<b><i>q<sub>k</sub></i></b>	Les échantillons du courant de la phase q
<b><i>N</i></b>	Nombre des échantillons
<b><i>mfrdq</i></b>	La moyenne des fractionnements des formes de Lissajous (en A)
<b><i>C</i></b>	Le facteur de fractionnement de la pompe en défaut
<b><i>f<sub>charge</sub></i></b>	Fréquence de synchronisme du stator (en Hertz)
<b><i>f<sub>s</sub></i></b>	fréquence fondamentale (en Hertz)
<b><i>f<sub>r</sub></i></b>	Fréquence de rotation du rotor (en Hertz)
<b><i>f<sub>s,ecc</sub></i></b>	Fréquence harmonique relative au défaut (en Hertz)
<b><i>n<sub>b</sub></i></b>	Le nombre des encoches du rotor
<b><i>k</i></b>	l'ordre des harmoniques du courant
<b><i>n</i></b>	l'ordre des harmoniques de temps
<b><i>s</i></b>	Glissement
<b><i>MCA</i></b>	Analyse du courant du moteur

## Résumé

Les techniques de surveillance et de diagnostic des défauts sont une solution primordiale pour la prévision des arrêts des machines industrielles. Ces techniques sont utilisées dans ce manuscrit pour le diagnostic des pompes d'une station de déminéralisation d'eau salée.

Dans cette étude nous avons utilisés deux techniques non intrusives à base de courant de moteur électrique. On les appelle les techniques non intrusives car les capteurs ne sont pas installés directement sur la pompe et ne nuisent pas au fonctionnement de la production. Ces techniques sont La Technique MCA et la technique des formes de Lissajous du vecteur de Park qui sont bien adaptées à l'atout de la redondance des pompes de cette unité.

Les mots clef :

- Station de déminéralisation d'eau salée
- Pompe centrifuge
- Technique MCA : Technique de l'analyse des courants du moteur ;
- Technique des formes de Lissajous : Technique d'analyse des courant dans le plan de Lissajou



## ملخص

تعد تقنيات مراقبة وتشخيص الأعطال حلاً أساسياً للتنبؤ بتوقف الآلات الصناعية. تستخدم هذه التقنيات في هذه المخطوطة لتشخيص مضخات محطة تنقية المياه المالحة.

في هذه الدراسة استخدمنا طريقتين غير تدخليتين تعتمدان على تيار المحرك الكهربائي. يطلق عليها تقنيات غير تدخلية لأن المستشعرات غير مثبتة مباشرة على المضخة ولا تتداخل مع عملية الإنتاج. هذه التقنيات هي تقنية تحليل تيارات المحركات وتقنية أشكال ليساجو لمتجه بارك التي تتكيف جيداً مع ميزة التكرار في مضخات هذه الوحدة.

### الكلمات المفتاحية

- محطة تنقية المياه المالحة
- مضخة طرد مركزي
- تقنية تحليل تيار المحرك.
- تقنية أشكال ليساجوس: تقنية تحليل التيارات في مستوى ليساجو

## Abstract

Fault monitoring and diagnostic techniques are an essential solution for predicting industrial machine stoppages. These techniques are used in this manuscript for the diagnosis of the pumps of a salt water demineralization station.

In this study we used two non-intrusive techniques based on electric motor current. They are called non-intrusive techniques because the sensors are not installed directly on the pump and do not interfere with production operation. These techniques are the MCA Technique and the technique of the Lissajous forms of the vector of Park which are well adapted to the advantage of the redundancy of the pumps of this unit.

The keywords:

- Salt water demineralization station
- Centrifugal pump
- MCA technique: Motor current analysis technique;
- Technique of Lissajous forms: Technique of analysis of currents in the plane of Lissajou

# Introduction général

La maintenance des pompes centrifugeuses dans les unités de déminéralisation des eaux salées est un enjeu important aussi bien pour la productivité que pour l'économie nationale [1] et les exploitations concurrentielles de ces pompes ont poussées ces unités à chercher comment assurer leurs disponibilités et leurs sûretés.

Ces exigences en matière de sûreté et de fonctionnement ont fait émerger une nouvelle science de l'ingénieur qui est la surveillance des équipements industriels. Cette dernière englobe la détection et le diagnostic des défauts. La détection des défauts a pour but principal d'améliorer et d'augmenter la disponibilité des systèmes à fin de réduire les coûts de la maintenance et d'éviter un arrêt brusque de la production. Par contre le diagnostic des défauts a pour rôle la localisation (déterminer quelle partie du système est affectée) et l'identification de ce défaut (quantification du défaut).

L'unité de déminéralisation d'eau compte sur l'élément le plus important de l'installation qui est la pompe centrifugeuse mais cette pompe finira par tomber rapidement en panne si elle n'est pas entretenue à temps.

Ces pannes engendrent un temps d'arrêt très important à compter le temps de réparation et surtout le temps d'approvisionnement en pièces de rechanges qui peut aller jusqu'à des jours et cause une pénurie sur les réseaux d'alimentation en eau potable, d'où la nécessité d'une étude pour une détection précoce des défauts des pompes avant qu'elles n'évoluent en un arrêt de panne.

Dans cette étude nous allons exploités des techniques de diagnostics qui ont fait leur preuves sur les machines tournantes pour distinguer l'état sain d'un état défectueux des pompes utilisées dans la station de déminéralisation d'eau installé au niveau de la wilaya d'El-Oued.

Les deux techniques de surveillance utilisées dans ce manuscrit sont l'analyse du courant du moteur électrique et la technique des calculs des fractions des formes de Lissajous du vecteur de Park.

Cette thèse comprend trois chapitres :

Dans le premier chapitre, une présentation des différentes sections de l'unité de déminéralisation d'eau dont les pompes centrifuges industrielles sont sujet de cette étude de

surveillance, puis une présentation des méthodes de calculs des paramètres propres des pompes centrifuges et en fin une présentation des défauts les plus répandus.

Dans le deuxième chapitre qui constitue l'essence de cette étude une présentation, des deux techniques utilisées pour la surveillance des pompes qui sont la technique d'analyse des courants des moteurs (MCA) et la technique des formes de Lissajous du vecteur de Park qui en plus de la méthode conventionnelle visuelle elle introduit un Critère géométrique relatif au déformations non visuelle de ces formes.

Dans le troisième chapitre c'est l'application de ces deux techniques sur une pompe installé sur un banc d'essai dans le but de valider les résultats avant de les projeter sur des pompes de la station de déminéralisation.

# Chapitre I Généralité

## I.1 Introduction:

Dans ce chapitre nous allons présenter les différentes sections de l'unité de déminéralisation d'eau salée et donner des généralités sur la pompe centrifuge pour finir avec les défauts qui reviennent le plus souvent sur cette pompe.

## I.2 Présentation de l'unité de déminéralisation de l'eau salée :

La région sud-est de l'Algérie fait partie des régions bâties sur une nappe albienne très riche en eau sous terraine mais qui nécessite un traitement de dessalement avant qu'elle ne soit potable. Une unité très importante de dessalement de l'entreprise étatique Algérienne des eaux(ADE) est installée récemment dans cette région avec une capacité de 40 000 m<sup>3</sup>/Jour d'eau brute [2] qui est acheminé durant les différentes phases de traitement par des pompes industrielles puissantes. Cette unité est constituée de :

### I.2.1 Station de l'eau brute:

Cette station a comme objectif d'alimenter les autres stations de l'unité en eau brute qui provienne des forages Echouhada, route de Touggourt et 19 mars, qui sera collectée dans un réservoir d'eau brute de capacité 1000 m<sup>3</sup>.

Dans le cas de l'arrêt de l'unité un by-pass est prévu pour dévier les eaux des forages. L'arrivée de chaque forage sera équipée d'un débitmètre électromagnétique équipé d'une sortie analogique 4.20 mA [3]



Figure I.1 : Vue globale de la station d'eau brute [2]

### I.2.2 Station de filtration sur sable :



Figure I.2 Station de filtre à sable [2]

Le système de filtration est composé principalement de :

- La bache d'eau brute.
- Les pompes d'alimentation des filtres.
- Les filtres à sable.
- La bache d'eau filtrée.
- La bache d'eau traitée

Le système de filtration servira pour alimenter la bache d'eau filtrée et en même temps alimenter la bache d'eau traitée en eau de mélange. On distingue deux modes de fonctionnement du système de filtration :

- Mode de fonctionnement normal : l'eau filtrée servira principalement pour alimenter la bache d'eau filtrée et la bache d'eau traitée (eau de mélange).
- Mode by-pass :
  - By-pass 01 : L'eau refroidie produite par les pompes d'eau brute servira seulement pour alimenter le réservoir d'eau traitée directement.
  - By-pass 02 : L'eau brute qui arrive à notre unité servira seulement pour alimenter le réservoir d'eau traitée directement.

Le système de filtration sur sable contient 6 filtres à sables et chaque filtre est équipée de :

- Une vanne d'alimentation en eau brute à commande pneumatique et avec Indicateurs de position.
- Une vanne de sortie d'eau filtrée, à commande pneumatique et avec indicateurs de Position.
- Une vanne de rinçage, à commande pneumatique et avec indicateurs de position.

- Une vanne d'alimentation en eau de lavage, à commande pneumatique et avec Indicateurs de position.
- Une vanne d'évacuation des eaux de lavage, à commande pneumatique et avec Indicateurs de position.
- Une vanne de purge d'air, à commande pneumatique et avec indicateurs de position.
- Une vanne d'alimentation en air de lavage, à commande pneumatique avec Indicateurs de position.

On dispose d'un sélecteur (L-O-D) combiné à des boutons poussoirs March et arrêt :

- Position O : correspond à l'arrêt de l'équipement.
- Position L : Correspond au mode de commande local en manuel.
- Position D : permet le démarrage de l'équipement depuis le HMI

Si le sélecteur est en position distante dans ce cas la marche et l'arrêt sont assurés par des boutons de l'afficheur (SCADA) [2].

### I.2.3 Station d'osmose inverse



Figure I.3: Station d'osmose inverse [2]

L'eau comporte des solutés et particulièrement des sels. Si deux solutions de concentrations différentes sont placées de chaque côté d'une membrane filtre, l'eau franchira la membrane par osmose jusqu'à ce que les concentrations s'équilibrent ou que la différence de pression

dépasse la pression osmotique Inversement, en exerçant dans un des compartiments une pression hydrostatique qui dépasse la pression osmotique, on force l'eau à quitter le compartiment sous pression en dépit de l'augmentation de concentration en soluté. On parle d'osmose inverse. La déminéralisation dans cette station est basée sur l'élimination des sels dissous dans l'eau par échange osmose inverse.

La station dispose de 3 lignes constitué chacune de bloque de cartouches de dessalement a osmose inverse [3].

#### I.2.4 Station d'évacuation de rejet :



Figure I.4 : Station de rejet [2]

La station d'évacuation de rejet est composée de :

- Quatre pompes,
- D'une bache de rejet de 250m<sup>3</sup>

Les pompes sont alimentées à partir de la bache de rejet. Les pompes fonctionnent en mode local ou en mode distant et sur le coffret de commande locale de chaque pompe, on dispose d'un sélecteur (L-O-D) combiné à des boutons poussoirs March et arrêt :

- Position O : correspond à l'arrêt de l'équipement.
- Position L : Correspond au mode de commande local en manuel
- Position D : permet le démarrage de l'équipement depuis le HMI selon les conditions.

Si le sélecteur est en position distante dans ce cas la marche et l'arrêt sont assurés par des boutons de l'afficheur (SCADA) [3].

### I.2.5 Station d'eau traitée :



Figure I.5 : Station d'eau traitée [2]

Les pompes sont alimentées à partir du réservoir d'eau traité (R1-5000m<sup>3</sup>). Les pompes fonctionnent en mode local ou en mode distant ; Sur le coffret de commande locale de chaque pompe.

On dispose d'un sélecteur (L-O-D) combiné à des boutons poussoirs March et arrêt.

- Position O : correspond à l'arrêt de l'équipement.
- Position L : Correspond au mode de commande local en manuel.
- Position D : permet le démarrage de l'équipement depuis le HMI selon les conditions d'automatisme.

Si le sélecteur est en position distante dans ce cas la marche et l'arrêt sont assurés par des boutons de l'afficheur (SCADA) [2].

## I.3 Rappel sur les pompes centrifuges :

### I.3.1 Définition:

Une pompe centrifuge est un système ouvert sur une conduite dans laquelle le fluide est mis en mouvement et par un champ de forces centrifuge. La pompe centrifuge fonctionne selon des notions simples citées comme suivant.



Figure I.6: Pompe KSB de l'station de déminéralisation d'eau salée de la société ADE [2]

### I.3.2 Principe de fonctionnement d'une pompe centrifuge :

On peut décomposer le fonctionnement en trois étapes :

#### I.3.2.1 Aspiration :

Le liquide est aspiré au centre du rotor 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.

#### I.3.2.2 Accélération :

La rotation augmente la vitesse du fluide tandis que la force centrifuge qui le comprime sur la périphérie augmente sa pression les aubes sont le plus souvent incurvées et inclinées vers l'arrière par rapport au sens de rotation mais ce n'est pas une obligation.

#### I.3.2.3 Refoulement :

A travers l'élargissement de la volute le liquide perd de la vitesse Au profit de l'accroissement de la pression : l'énergie cinétique est convertie en énergie de pression.

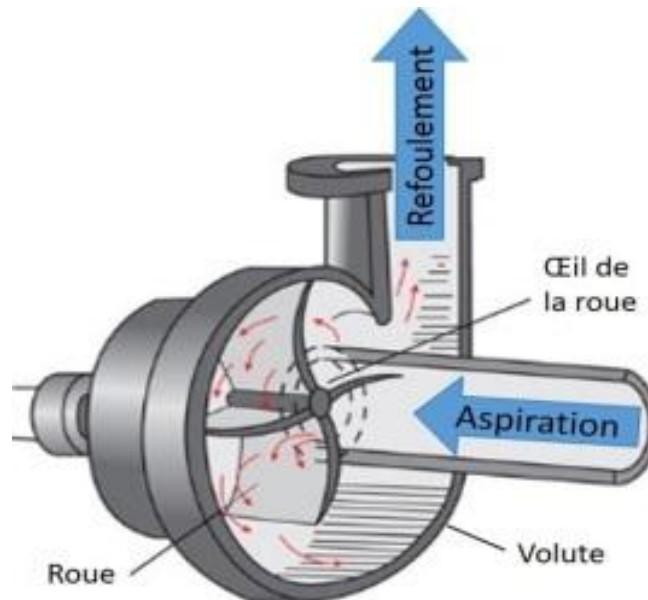


Figure I.7 : Coupe latérale d'une pompe centrifuge

### I.3.3 Découpe d'une pompe centrifuge

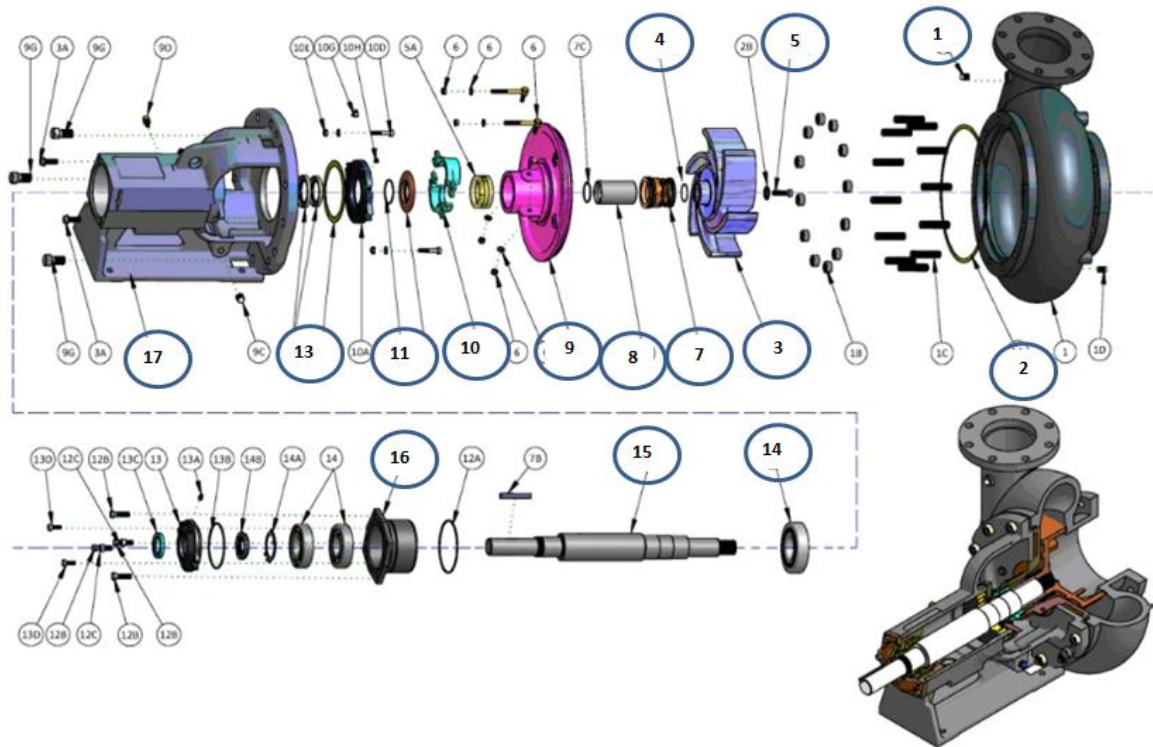


Figure I.8 : Découpage d'une pompe centrifuge industrielle [4]

- |                             |                        |                       |
|-----------------------------|------------------------|-----------------------|
| 13- Volute                  | 7- Joint mécanique     | 1- Joint plat         |
| 14- Rondelle de joint       | 8- Bague d'usure       | 2- Roulement          |
| 15- La Roue                 | 9- Joint mécanique box | 3- Arbre              |
| 16- Joint torique           | 10- Bague à coulisse   | 4- Collier de réglage |
| 17- Boulon fixation de roue |                        |                       |

### I.4 Calcul des Propriétés général d'une pompe centrifuges :

La maintenance des pompes nous impose à avoir des connaissances sur quelques paramètres primordiaux qui sont :

- La hauteur manométrique totale
- Le débit à la sortie de la pompe (donnée par un capteur de débit)
- La pression d'entrée et la pression de sortie (donné par des capteurs de pression)
- La puissance hydraulique de la pompe
- Le rendement de la pompe
- NPSH (Net Positif Suction Head) ou la pression nette positive à l'entrée de la pompe

### I.4.1 Calcul de la hauteur manométrique totale :

Plutôt que d'exprimer cette valeur en pascals ou en bars, unités classiques de pression, cette valeur est généralement donnée en mètres, soit la hauteur de la colonne de liquide nécessaire pour créer une pression identique. On parle de mètres de colonne d'eau (noté mce).

La hauteur manométrique totale est définie comme la pression que doit fournir une pompe à sa sortie pour assurer une pression voulue à une hauteur donnée.

La formule de calcul est :

$$HMT = H_a + H_r + P_c + P_r \quad (I.1)$$

- **H<sub>a</sub>** : hauteur manométrique d'aspiration
- **H<sub>r</sub>** : hauteur manométrique de refoulement
- **P<sub>c</sub>** : pertes de charges moyennes
- **P<sub>r</sub>** : pression de refoulement souhaitée à l'ouverture du robinet

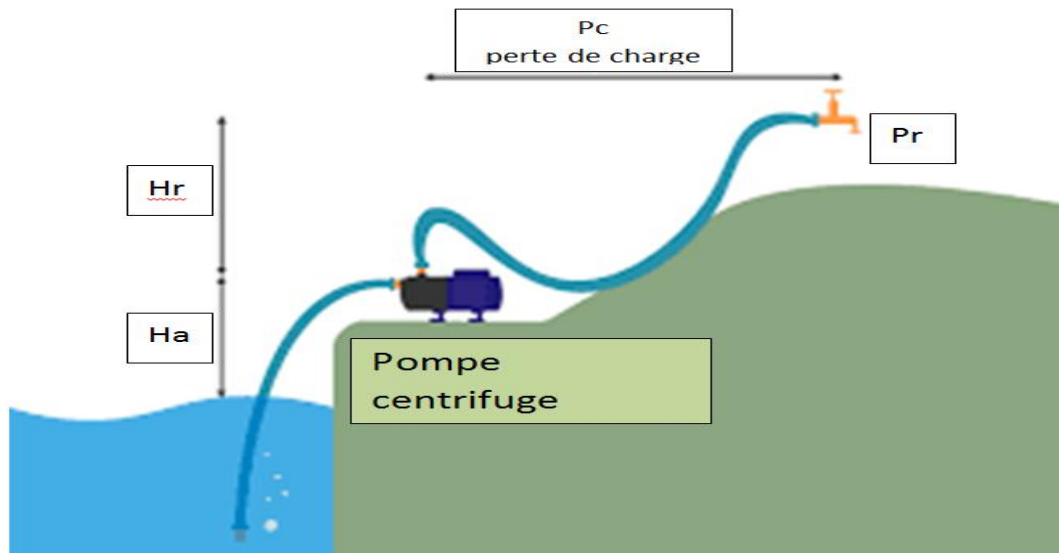


Figure I.9 Illustration des hauteurs propre d'une pompe

Après calcul de la HMT de la pompe et étant donné le débit de la sortie on peut localiser le point de fonctionnement de cette pompe dans le diagramme caractéristique et définir d'autres paramètres comme le diamètre de la roue turbine, la puissance du moteur, le rendement.

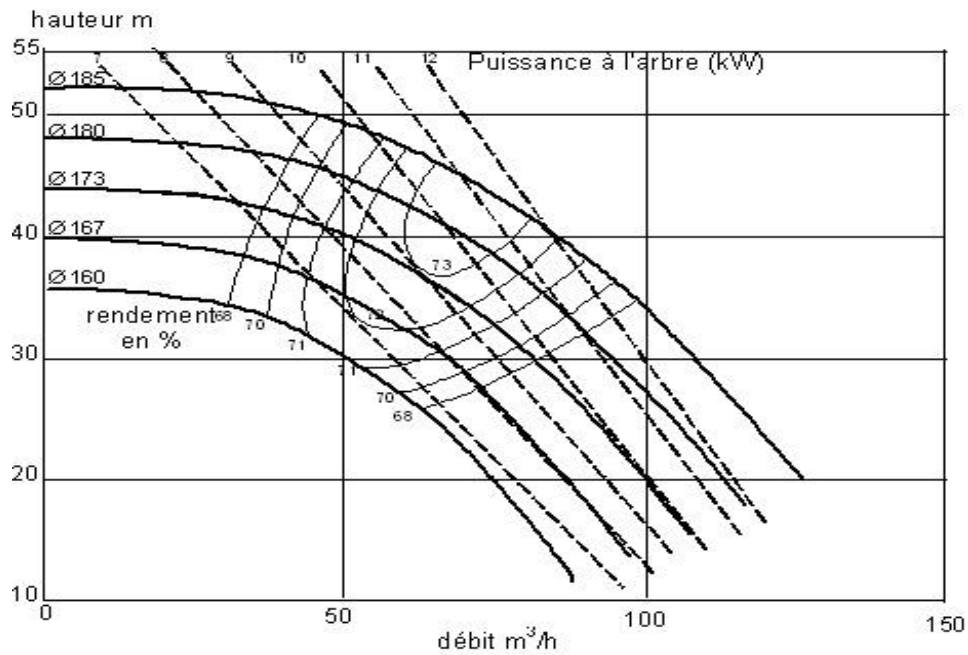


Figure I.10 : Courbe caractéristique d'une pompe centrifuge [5]

Cette courbe que nous appelons courbe caractéristique de la pompe montre qu'à tout débit de la pompe correspond une hauteur de refoulement déterminée et plus le débit augmente, plus la hauteur de refoulement diminue.

Si la courbe de la pompe et le point de charge de l'installation ne se rencontrent pas dans le point recommandé par le constructeur, on dit que le fonctionnement de la pompe se situe en dehors des limites de la courbe (Voir l'Annexe pour la caractéristique d'une pompe de la station).

Les calculs qui suivent sont effectués à partir des données des capteurs de débits et de pressions disponibles au niveau de l'unité de déminéralisation.

#### I.4.2 Calcul de la puissance hydraulique

La puissance hydraulique est donnée par :

$$P_h = \Delta p \cdot Q \quad (I.2)$$

- $\Delta p$  : différence de pression entre l'aspiration et le refoulement
- $Q$  : débit volumique

La différence de pression est appelée aussi hauteur manométrique de la pompe qu'on ne doit pas confondre avec la hauteur manométrique total HMT

### I.4.3 Calcul du rendement :

Le rendement est donné par :

$$\eta = P_h / P_m \quad (I.3)$$

- $P_h$  : la puissance hydraulique
- $P_m$  : la puissance du moteur prélevé de la plaque signalétique

### I.4.4 Calcul de NPSHd (Net Positive Suction Height) :

NPSHd est la pression positive nette disponible à l'entrée de la pompe. C'est la pression minimum qu'on doit garder à l'entrée d'une pompe pour éviter le phénomène de cavitation.

On appelle cavitation la naissance de bulles de gaz ou de vapeur dans un liquide soumis à une dépression inférieure à la pression de vapeur saturante du fluide ( $P_{vs}$ ). A l'entrée d'une pompe centrifuge peut se présenter une dépression dû à l'aspiration de la pompe et au rétrécissement brusque de section de tuyauterie d'entrée, ce qui fait qu'une cavitation peut se présenter et engendre une détérioration à ce niveau à cause de l'explosion de ces bulles de gaz ou de vapeur.

Le NPSHd est calculé par la formule suivante :

$$NPSHd = P_{atm} - P_{vs} - J_{asp} - H_h \quad (I.4)$$

- $P_{atm}$  : pression atmosphérique (en pascal)
- $P_{vs}$  : pression de vapeur saturante du fluide (en pascal)
- $J_{asp}$  : Perte de charge à l'aspiration
- $H_h$  : Hauteur hydraulique à l'entrée de la pompe (négative en cas de pompe sous charge)

Le NPSHd (NPSH disponible) calculé doit être supérieur au  $NPSHr$  (NPSH requis) donné par le fournisseur de la pompe.

Les valeurs qu'on vient de calcul sont généralement livrées par le fournisseur de la pompe sous forme de graphe dans des fiches techniques ou des abaques qui permettent de connaître les valeurs nominales d'une pompe en bon état. (Voir l'annexe).

On peut exploiter ces valeurs pour effectuer des surveillances et des diagnostics de la pompe et de connaître l'état critique des défauts.

## I.5 Présentation des défauts des pompes centrifugeuses:

Les pompes centrifuges ne succombent que rarement à une mort naturelle. Au sein de .Un suivie des destructeurs des pompes de notre unité nous a acquis un aperçu sur les causes de défaut d'une pompe centrifugeurs [8]:

### I.5.1 Fuite affectant une garniture d'étanchéité d'arbre :

Les fuites affectant une garniture d'étanchéité occupent la première place au classement des causes de défaut des pompes. Pas moins de 75 % des pompes doivent leur mise hors service à la perte d'étanchéité d'une garniture mécanique.

**Table I.1 : Répartition des causes de panne des pompes centrifuge [9]**

Cause	Nombre	%Total
<b>Roulement</b>	25	10,5
<b>Chambre basse</b>	1	0,42
<b>Bague d'usure</b>	2	0,84
<b>Roue courante</b>	9	3,38
<b>Boulons</b>	1	0,42
<b>Joint mécanique</b>	179	75,12
<b>Arbre</b>	12	5,56
<b>Chemise d'arbre</b>	9	3,78
<b>Total</b>	<b>238</b>	<b>100</b>

### I.5.2 Point de fonctionnement :

La sélection des pompes appropriées est loin d'être simple, d'où la multiplication des erreurs commises à l'installation considérée. Il est important que le point de fonctionnement de la pompe se situe dans la plage de fonctionnement de cette dernière. Si ce point se situe trop à gauche ou à droite de cette plage la durée de vie utile de la pompe en pâtira.

Il est préférable de sélectionner une pompe dont le point de fonctionnement soit le plus proche possible du point de rendement maximal.

### I.5.3 Cavitation :

Fort heureusement, la cavitation n'est pas une tueuse « silencieuse » : un bruit excessif en est l'un des symptômes. De plus, cette tueuse laisse des traces de son action dévastatrice telle que la formation de cratères ou de piqûres à la surface des pales du rotor, variations de

pression visibles sur le cadran d'un manomètre, variations de pression inexplicables au sein de la tuyauterie de refoulement et vibrations excessives.

#### **I.5.4 Pièces d'origine incertaine :**

Les pièces requises de moyenne ou de mauvaise gamme destinées à une pompe constituent une raison pour l'usure et remplacement précoce de ces pièces et d'autres pièces concernées par l'impact de nouvelles pièces non d'origine.

Il n'a pas fallu longtemps à KSB pour réaliser que les paramètres de conception initiaux des pompes différaient considérablement des conditions d'exploitation effectives. Cette divergence avait entraîné une surcharge des pièces étudiées, laquelle s'était traduite par leur usure et leur défaut prématurée. KSB avait fait parvenir au client son rapport et ses recommandations ainsi que l'offre demandée portant sur les pièces requises.

#### **I.5.5 Sélection erronée des matériaux :**

Bon nombre de pompes sont conçues pour acheminer un fluide déterminé. La nature de ce fluide détermine le choix des matériaux, à sélectionner en fonction de la composition et des propriétés du fluide considéré : température, pH, pollution et caractéristiques chimiques.

Le fabricant choisit les matériaux adéquats pour assembler la pompe voulue. Toutes les pièces appelées à entrer en contact avec le liquide sont adaptées à son pompage.

#### **I.5.6 Présence d'air :**

Une pompe centrifuge standard n'est pas en mesure de pomper de l'air ; c'est la raison pour laquelle, ces pompes nécessitent un amorçage manuel. Certaines pompes centrifuges sont dotées d'un réservoir tampon incorporé qui permet d'éliminer l'air lors de la phase de démarrage

#### **I.5.7 Contraintes mécaniques :**

Sous l'effet de la pression trop importante exercée sur les brides, le corps de certaines pompes risque de se déformer au point de gripper la bague d'usure ou de gauchir l'arbre de la pompe. Les paliers et garnitures d'étanchéité sont soumis à des contraintes involontaires et l'alignement des arbres de la pompe et du moteur d'entraînement est réduit à néant.

#### **I.5.8 Rotation à sec, gel et circulation :**

Les kilowatts absorbés par la pompe pour en générer le débit et la pression de refoulement sont partiellement convertis en énergie et en chaleur que nous devons nous en débarrasser.

Le constructeur de pompes indique le débit que nécessite une pompe spécifique pour dissiper la chaleur générée. À cet égard, il faut tenir compte du contenu calorifique du liquide pompé ainsi que du volume de la pompe et les paramètres des conduites et de refoulement.

#### **I.5.9 Maintenance négligée:**

Le fait que l'on ne prenne pas toujours au sérieux la maintenance des pompes centrifuge est peut-être dû à leur robustesse. Par conséquent, leur usage et leur maintenance insuffisante causeraient plus rapidement l'apparition de problèmes. Négliger la maintenance d'une installation de pompage nuit considérablement à sa fiabilité.

#### **I.5.10 Mauvais alignement :**

Plus de 50 % des défauts affectant les machines tournantes sont causées par un alignement incorrect. De tels défauts d'alignement favorisent l'apparition de problèmes tels que l'usure ou la rupture d'accouplements, l'émission de vibrations ainsi qu'une usure excessive des paliers, garnitures d'étanchéité et bagues d'usure.

#### **I.6 Conclusion :**

Nous avons présentés dans ce chapitre l'unité de déminéralisation des eaux salées avec ses pompes et leurs défauts célèbres. Dans le chapitre qui suit nous allons choisir deux techniques de diagnostics qui conviennent le mieux aux contraintes de production de l'unité et à la disponibilité des pompes.

Ceux sont la technique de l'analyse des courants du moteur (MCA) et la technique des formes de Lissajous du vecteur de Park.

## **Chapitre II**

### **Présentation des techniques de diagnostics utilisée**

## II.1 Introduction

dans ce chapitre, nous avons présentés deux techniques de diagnostics à base de capteur de courant qui sont La technique d'analyse du courant du moteur qui entraîne la pompe et la technique des fractions de formes de Lissajous du vecteur de Park.

La première technique (MCA) est une technique très connue dans le domaine du diagnostic des moteurs électriques, elle est exploitée dans ce chapitre pour le diagnostic des pompes centrifuges.

La deuxième technique est la technique des formes de Lissajous du vecteur de Park qui utilise un facteur qui relie le fractionnement d'une forme avec le défaut correspondant.

Mais avant de commencer nous allons donner un aperçu général sur le classement des techniques de diagnostics selon les méthodes utilisées.

## II.2 Classement des techniques de diagnostics :

Les techniques de surveillance et de diagnostic sont très nombreuses et ils sont classés selon différents critères telle que la nature stochastique ou déterministe des données, le modèle analytique ou statistique des défauts ou encore l'exploitation intrusive ou non intrusive du système.

Dans ce qui suit nous allons classer ces techniques selon le principe des méthodes utilisées:

### II.2.1 Les techniques de redondance Matérielle:

Le concept de cette méthode est de se repérer sur un système en bon état pour le diagnostic d'un autre en défaut à partir d'une comparaison entre des composants dupliqués de même type pour mesurer une même valeur. Les éléments de l'un seront prisent comme repère pour mesurer une valeur nominal afin de juger l'état sain ou défectueux du système sujet du diagnostic. [10]

### II.2.2 Les techniques des modèles (redondance analytique):

Le diagnostic des défauts basé sur un modèle a été créé par Beard en 1971 afin de remplacer la redondance matérielle par une redondance analytique, et des résultats complets ont été documentés. Dans les méthodes basées sur des modèles, les modèles des processus industriels ou des systèmes pratiques doivent être disponibles, ce qui peut être obtenu en utilisant soit des principes physiques, soit des techniques d'identification de systèmes sur la base du modèle.

Des algorithmes de diagnostic de pannes sont développés pour surveiller la cohérence entre les sorties mesurées des systèmes pratiques et les sorties prédites par le modèle. [11]

### II.2.3 Les techniques des signaux:

Les méthodes basées sur les signaux utilisent des signaux mesurés plutôt que des modèles d'entrée-sortie explicites pour le diagnostic des défauts.

Les défauts du processus sont reflétés dans les signaux mesurés dont les caractéristiques sont extraites, et une décision de diagnostic est alors prise sur la base de l'analyse des symptômes et des connaissances préalables sur les symptômes des systèmes en bonne état.

Les méthodes de diagnostic basées sur les signaux ont une large application dans la détection et le diagnostic en temps réel des moteurs à induction, des convertisseurs de puissance et des composants mécaniques d'un système [11]

Dans ce qui suit Nous allons utiliser une technique de surveillance non intrusive connue sous le nom de MCA avec une autre technique qui est la technique des formes de Lissajous du vecteur de Park.

### II.3 Technique d'analyse du courant du moteur (MCA) :

L'analyse du courant du moteur nommée (MCA) a trouvé une large application, en particulier dans les moteurs à induction. La base de cette technique est l'évaluation du courant d'un moteur et l'exploitation de ses métriques spectral pour le diagnostic et la surveillance des systèmes entraînés par des moteurs électrique.

Les métriques spectrales sont tirées après une transformé de fourrier du courant du stator

#### II.3.1 Rappel sur la transformé de fourrier discret (DFT) et rapide (FFT) :

La transformé de fourrier pour un signal continu  $f(t)$  est très connue par la formule :

$$\hat{f}(\omega) = \mathcal{F}(f(x)) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{-i\omega x} dx \quad (\text{II.1})$$

Cette formule est considéré comme une transaction de la présentation temporelle d'un signale vers la présentation en composante harmonique fréquentielle.

Cependant, lorsque on travaille avec des données a traitées dans un calculateur il est nécessaire d'approximer la transformée de Fourier sur des vecteurs discrets. [12]

La transformé DFT est donnée par la formule :

$$\hat{f}_k = \sum_{j=0}^{n-1} f_j e^{-\frac{i2\pi jk}{n}} \quad (\text{II.2})$$

La transformée de Fourier (DFT) est essentiellement une version discrétisée de la série de Fourier pour un vecteurs de données  $f = [f_1 \ f_2 \ f_3 \ \dots \ f_n]$  obtenu en discrétisant la fonction  $f(x)$  à un espacement régulier,  $x$ , comme le montre la figure ci-dessous. [12]

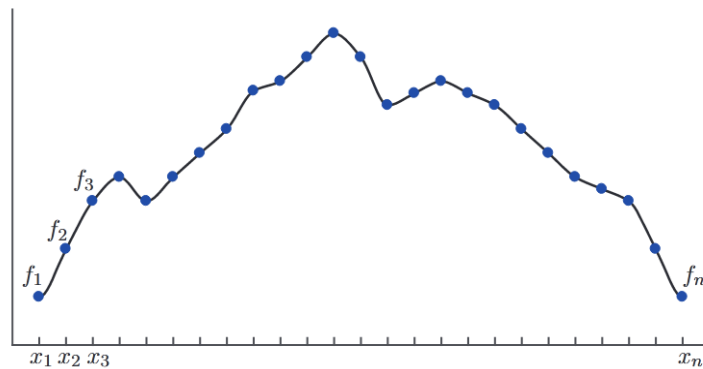


Figure II.1 Données discrètes échantillonnées pour la transformée de Fourier discrète. [13]

$$\{f_1, f_2, \dots, f_n\} \xrightarrow{\text{DFT}} \{\hat{f}_1, \hat{f}_2, \dots, \hat{f}_n\}. \quad (\text{II.3})$$

Pour un nombre donné de points  $n$ , la DFT peut être calculé par multiplication matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \hat{f}_1 \\ \hat{f}_2 \\ \hat{f}_3 \\ \vdots \\ \hat{f}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & \omega_n & \omega_n^2 & \dots & \omega_n^{n-1} \\ 1 & \omega_n^2 & \omega_n^4 & \dots & \omega_n^{2(n-1)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 & \omega_n^{n-1} & \omega_n^{2(n-1)} & \dots & \omega_n^{(n-1)^2} \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

La DFT est extrêmement utile pour l'approximation et le calcul numérique mais elle ne s'adapte pas bien aux très grandes dimensions  $n$  car la formulation simple implique la multiplication par une matrice  $n \times n$  dense, nécessitant  $O(n^2)$  opérations.

En 1965 James W. Cooley (IBM) et John W. Tukey (Princeton) ont développé la transformée de Fourier rapide révolutionnaire (FFT)

Avec la transformé de fourrier rapide le nombre de multiplication par la matrice DFT est réduit de  $O(n^2)$  à  $O(n \cdot \log(n))$ . [12]

L'idée de base derrière la FFT est que la DFT peut être mise en œuvre beaucoup plus efficacement si le nombre de points de données  $n$  est une puissance de 2.

Par exemple, considérons  $n = 1024 = 2^{10}$

$$\hat{\mathbf{f}} = \mathbf{F}_{1024} \mathbf{f} = \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{512} & -\mathbf{D}_{512} \\ \mathbf{I}_{512} & \mathbf{D}_{512} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{512} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{F}_{512} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{\text{even}} \\ \mathbf{f}_{\text{odd}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

Avec :

- $\mathbf{f}_{\text{even}}$  éléments d'indice pairs de  $\mathbf{f}$ ,
- $\mathbf{f}_{\text{odd}}$  sont les éléments d'indice impairs de  $\mathbf{f}$ ,
- $\mathbf{I}_{512}$  est la matrice d'identité  $512 \times 512$
- $\mathbf{D}_{512}$  est donné par

$$\mathbf{D}_{512} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \omega & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & \omega^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & \omega^{511} \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Cette expression peut être dérivée d'une comptabilisation et d'une réorganisation minutieuse des termes dans (3.2) et (3.4).

Si  $n = 2p$ , ce processus peut être répété et  $\mathbf{F}_{512}$  peut être représenté par  $\mathbf{F}_{256}$ , qui peut alors être représenté par  $\mathbf{F}_{128} \rightarrow \mathbf{F}_{64} \rightarrow \mathbf{F}_{32} \rightarrow \dots$

Si  $n$  est différent de  $2p$ , cela peut être complété par des zéros jusqu'à ce qu'il soit une puissance de 2. La FFT implique alors un entrelacement d'indices pairs et impairs de sous-secteurs de  $\mathbf{f}$ , et le calcul DFT total est réduit à plusieurs petits calculs DFT  $2 \times 2$  [13]

La transformé de fourrier rapide est effectué dans Matlab par la commande : *fft* [12]

### II.3.2 Justification du choix de la technique MCA:

Le choix de cette technique revient au fait qu'elle utilise des courants comme données et qui sont acquises via des capteurs disponible et intégré dans les armoires de commande.

Cette technique n'exige pas l'arrêt de la pompe et évite ainsi tout impacte sur le rendement de la production et elle est non intrusive, donc pas besoin d'installé des capteurs sur la pompe en dépit de l'exposer à la nuisance du montage et du démontage.

### II.3.3 Résumé de la technique :

La technique MCA est utilisée pour le diagnostic des défauts qui induisent des fluctuations de couple ou de vitesse, et s'est avérée idéale pour l'analyse des défauts du moteur. L'idée dans cette technique est d'effectuer ce principe pour analyser les défauts de la pompe centrifuge. Cette analyse est établie après une transformation de fourrier des courants induits. La figure ce dessous illustre les étapes de cette technique [14] :

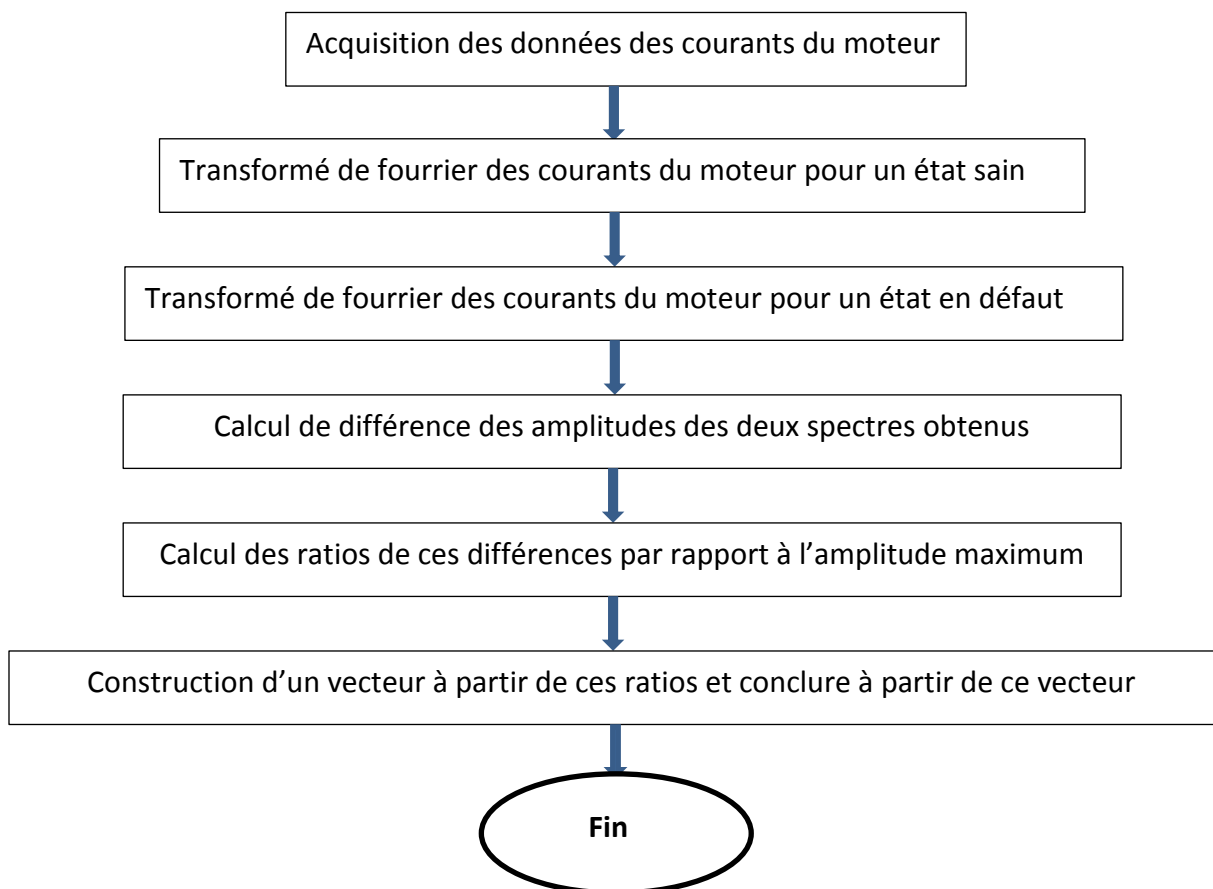


Figure II.2 : Flux du travail avec la technique MCA [14]

### II.3.4 Inconvénient de la technique MCA :

La technique MCA décèle n'importe quelle oscillation dans le couple de charge et induit les fréquences correspondantes dans le spectre du courant du stator.

Cependant, il est difficile de distinguer les différences des spectres venant en concordance avec les défauts à cause de la miniature de l'amplitude comme le montre la figure suivante :

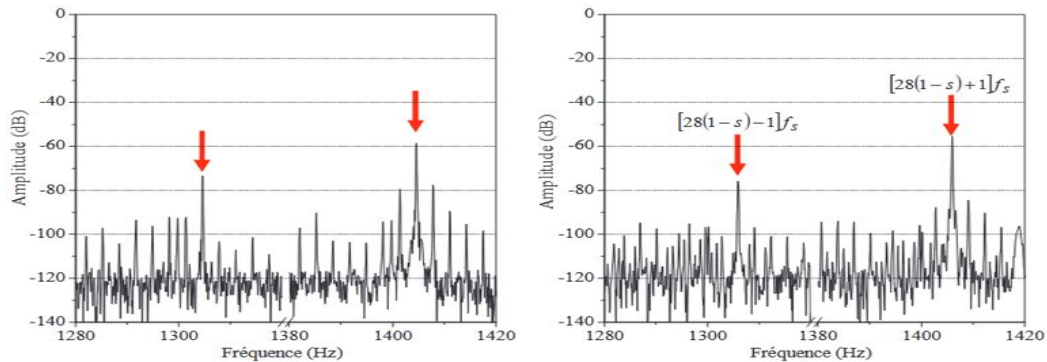


Figure II.3 : Spectre de défaut d'une machine asynchrone avec désalignement à gauche et en bon état à Droite [15]

Dans cette approche d'étude on remarque que les fréquences caractéristiques des défauts statiques sont difficilement différenciable.

La technique suivante est choisie en dépit de ces inconvénients et elle se base sur une analyse temporelle et extrait un critère de diagnostic selon des formes de Lissajous du vecteur de Park.

## II.4 Technique des formes Lissajous du vecteur de Park :

Cette technique est inspirée des tracées des formes de Lissajous des courants de ligne pour mesurer le courant des moteurs électriques. On plus de la méthode conventionnelle visuelle des formes, un facteur est introduit dans cette étude qui mesure le fractionnement de ces formes. [16].

Cette technique est exploitée dans cette étude pour le diagnostic des pompes de l'unité de déminéralisation d'eau salé dans le cadre des techniques de redondances matérielles.

### II.4.1 Justification du choix de cette technique :

Bien que le la technique MCA soit une meilleure alternative au techniques intrusives mais les harmoniques associées à certains défauts sont difficilement distinguables et leur amplitudes sont très faibles et risquent d'être noyer dans les bruits de l'environnement.

Nous allons aborder une technique qui utilise un facteur distinguable vis-à-vis des défauts qui lui sont attribués tout en gardant les avantages intrusifs de la technique MCA. [16]

#### II.4.2 Résumé de la technique:

Cette technique [17] comprend les méthodes non intrusives basées sur la mesure des courants du stator. Dans cette technique les courants du stator du moteur, qui entraîne la pompe, sont mesurés puis converties en courants d-q biphasés de Park.

Ces courants d-q sont tracés dans un plan de phase sous forme courbes, et un critère est extrait en relation avec les fractions de ces courbes pour le diagnostic des défauts. [16]

#### II.4.3 Rappel sur la transformation de Park:

La transformation de Park est la transformation des grandeurs de la machine triphasée à celles d'une machine biphasée, selon les deux axes d et q. on obtient de cette transformation les vecteurs de Park des tensions, des flux et des courants.

Cette technique utilise les deux composantes transformées du courant selon les deux axes d et q à partir des courants du stator selon la formule suivante :

$$i_{sd} = \left(\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\right) i_{sa} - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right) i_{sb} - \left(\frac{1}{\sqrt{6}}\right) i_{sc} \quad (\text{II.7})$$

$$i_{sq} = \left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right) i_{sb} - \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) i_{sc} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

- $i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$  : les courants du stator
- $i_{sd}$  : La composante d'axe directe du vecteur de Park désigné dans cette étude par d
- $i_{sq}$  : La composante d'axe quadratique du vecteur de Park désigné dans cette étude par q

#### II.4.4 Rappel sur la méthode conventionnel visuelle des formes de Lissajous:

Les indicateurs métriques temporels dans cette technique sont les amplitudes d-q des courants de Park. Ces amplitudes sont présentées dans un plan sous forme de motifs pour une analyse visuelle en premier temps. [16]

Les deux figures ci-dessous présentent un exemple de motif d'une pompe en bon état et une autre pompe en défaut.

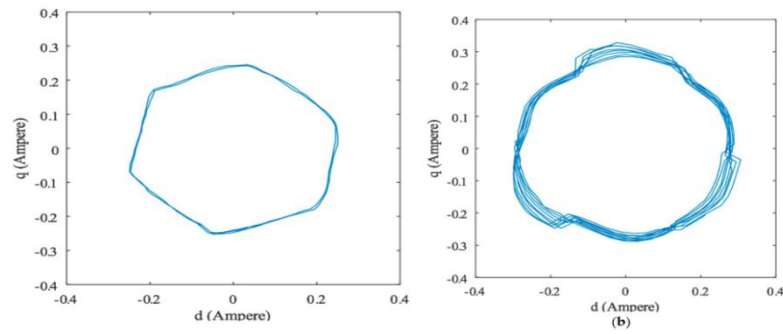


Figure II.4 : Forme de Lissajous des courant de Park pompe saine à gauche et en défaut à droite [16]

Les déformations visuelles des formes de Lissajous révèlent une information pour la détection d'un état en défaut, mais l'inverse n'est pas toujours vrai car une déformation peut être non visuelle.

La distance euclidienne de chaque point par rapport au centre 'O' comprend une information sur la ségrégation de ces motifs [16] mais ne la révèle pas de façon concrète.

Un extracteur de critère (une fonction mathématique) est appliqué sur ces métriques pour obtenir un critère plus significatif par rapport aux déformations des formes de Lissajous

#### II.4.5 Présentation de l'extracteur de critère utilisé :

L'extracteur présenté est une application de l'espace métrique de l'ensemble des points (d, q) vers l'ensemble des nombre réels. Il est donné par la formule suivante :

$$C = \frac{m_{dq}}{m_{fdq}} \quad (\text{II.9})$$

- $m_{dq}$  : moyenne de ces distances des points par rapport au centre du plant 'O'
- $m_{fdq}$  : moyenne de fractionnement des distances.
- $C$  : le facteur de fraction des courbes de Lissajous

#### II.4.5.1 Calcul de $m_{dq}$ :

La moyenne de ces distances est donnée par la formule suivante :

$$m_{dq} = \sum_{k=1}^N \frac{\sqrt{d_k^2 + q_k^2}}{N} \quad (\text{II.10})$$

- $d_k$  : Les échantillons du courant de la phase d
- $q_k$  : Les échantillons du courant de la phase q
- N : Nombre des échantillons

#### II.4.5.2 Calcul de $mf_{dq}$ :

Une autre information pour distinguer ces motifs est le fractionnement des formes.

On appelle fractionnement la différence entre la distance par rapport au centre 'O' d'un point avant la médiane et un autre point après la médiane dans le même ordre d'échantillon [16].

La moyenne des fractionnements est donnée par la formule suivante :

$$mf_{dq} = \sum_{k=1}^{N/2} \frac{\sqrt{d_k^2 + q_k^2} - \sqrt{d_{\frac{N}{2}+k}^2 + q_{\frac{N}{2}+k}^2}}{N/2} \quad (\text{II.11})$$

#### II.4.6 Présentation des défauts en relation avec le critère de fraction :

Le tableau suivant un exemple de quelque défaut d'une pompe centrifuge selon le critère de fraction de forme de Lissajous des courants de Park:

**Table II.1 : Défauts résultants avec la technique des formes Lissajous du vecteur de Park [16]**

Type du défaut	Facteur C
Défaut de roulement	1.75, 1.70
Défaut d'excentricité	1.64
Défaut de roue	1.25, 1.90, 2,40
Blocage de tuyau	2.20, 2.90

La figure ci-dessous illustre les étapes de cette technique :

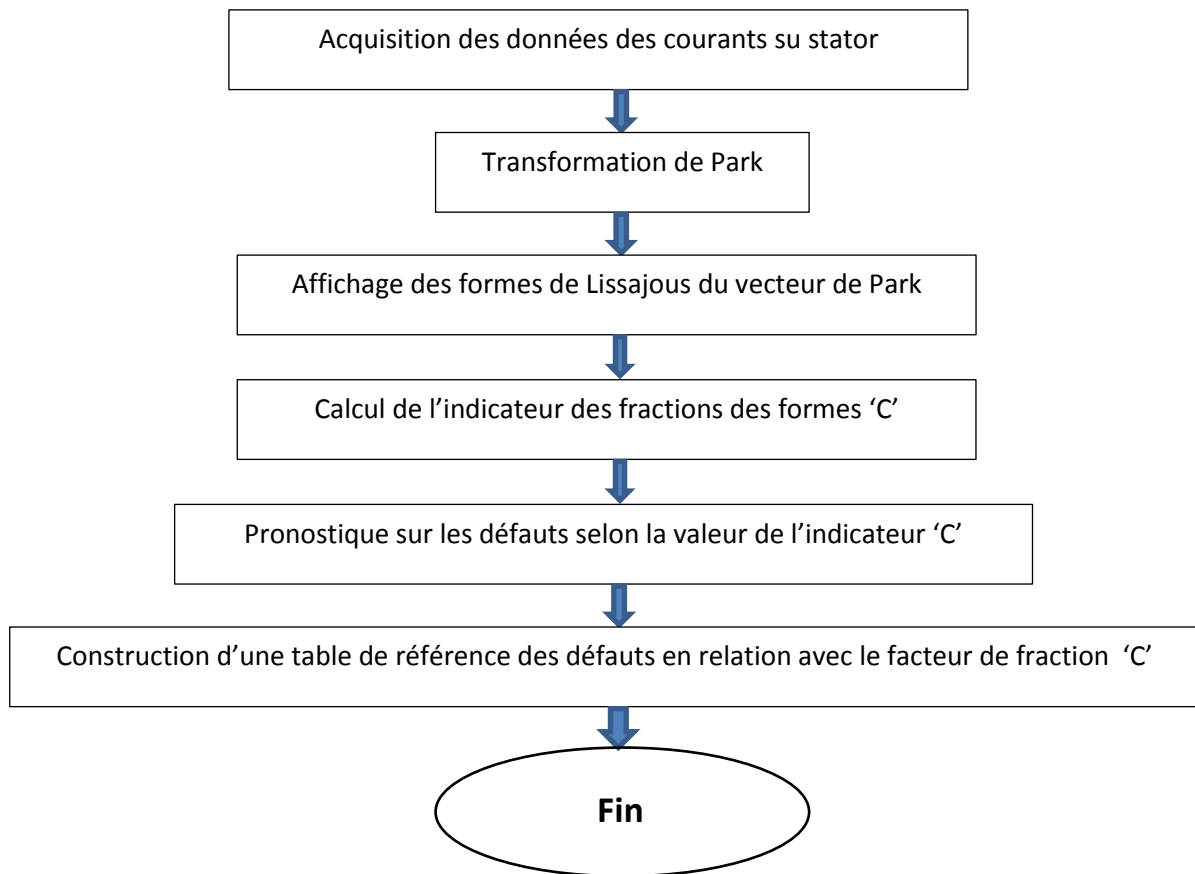


Figure II.5 : Flux du travail de la technique des formes de Lissajous du vecteur de Park [16]

## II.5 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté deux techniques de diagnostic des défauts qui sont basées sur les courants du moteur, donc ils sont non intrusives et ne dérangent pas le déroulement de la production au moment des diagnostics.

Ces deux techniques seront projetées sur une pompe centrifuge sur un banc d'essai et ils doivent être mis à l'épreuve par des simulations au laboratoire pour des essais de confirmations.

La technique MCA qui est une technique très basique dans le diagnostic des machines électriques tournantes sera utilisée en partant de la distinction des métriques spectrales de chaque défaut et non pas à partir d'un modèle mathématique.

Aussi pour la technique des formes de Lissajous du vecteur de Park qui sera basée sur un extracteur de critère calculé à partir des métriques temporelles de ces formes.

# **Chapitre III**

## **Etude expérimentale**

### III.1 Introduction :

Pour valider les résultats des techniques citées dans la partie théorique nous avons effectués des tests d'essais d'une pompe installée sur un banc d'essai au niveau du laboratoire LEVRES à l'université d'El Oued.

L'objectif est de mener une étude expérimentale sur les défauts qui peuvent affecter une pompe centrifuge pour confirmer nos techniques proposés avant de les appliquer sur terrain. Ensuite ces techniques seront projetées sur une pompe de la station de déminéralisation d'eau et les résultats sur terrain seront exploités pour toute pompe de même type et dans les mêmes conditions de fonctionnement en tenant compte de la redondance des pompes dans cette unité.

### III.2 Description du banc d'essai :

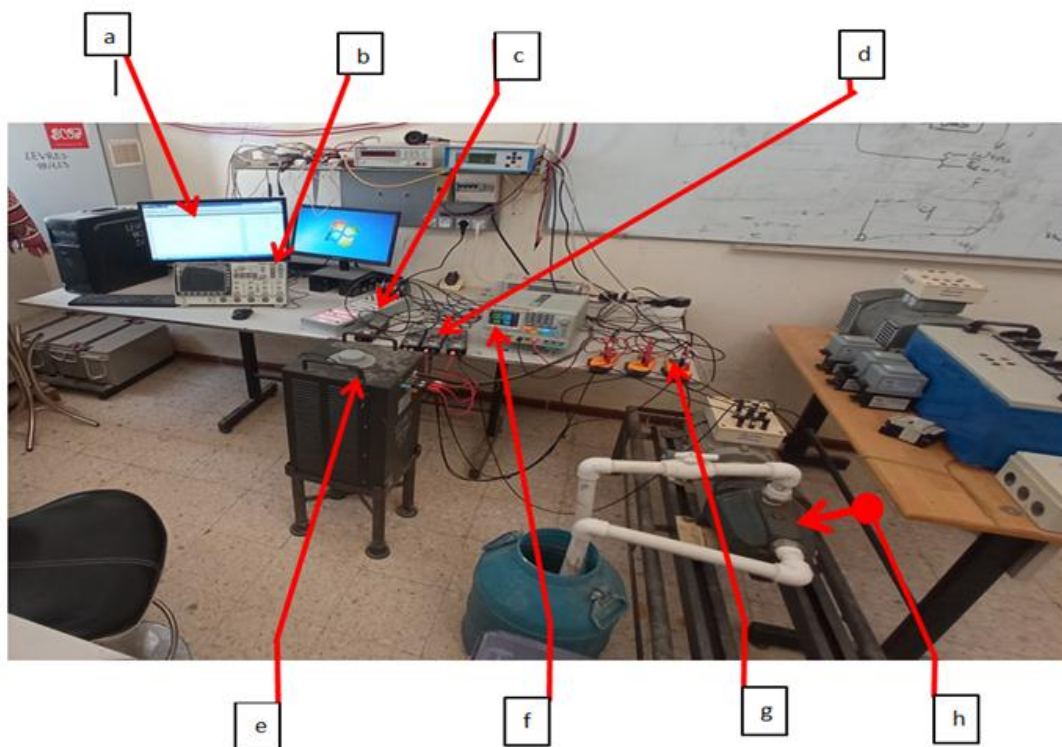


Figure III.1 : Banc d'essais au niveau du laboratoire LEVRES

- |  |                                    |
|--|------------------------------------|
| a. Logiciel d'acquisition DSPACE         | e. Potentiomètre de démarrage      |
| b. Oscilloscope numérique                | f. Générateurs de tension 5V       |
| c. Carte d'interface externe DSPACE 1104 | g. Capteur de courant (Fluke i30s) |
| d. Adaptateur de tension                 | h. Pompe centrifuge                |

Nous avons réalisé des expériences pour simuler cinq défauts qui sont :

- Défaut d'obturation partielle de la conduite d'entrée
- Défaut d'obturation total de la conduite d'entrée
- Défaut de marche sans charge
- Défaut de marche à sec
- Défaut de désalignement

Les essais sont effectués à base des capteurs de courants (g) ; les données de ces capteurs sont transmises vers le PC par l'intermédiaire d'une carte d'acquisition DSPACE 1104 (c) et gérées sous le logiciel de Control-desk (a). Le logiciel Control-desk est utilisé comme intermédiaire pour exporter les données acquises vers le Workspace du logiciel Matlab afin de les soumettre aux techniques de diagnostics étudiées dans ce mémoire. La visualisation de la tension de sortie est assurée par les adaptateurs de tension(d) et l'oscilloscope numérique(b).

### III.3 Technique de l'analyse du courant du moteur MCA:

On commence par la comparaison du spectre en défaut avec le spectre en bonne état, puis on prélève la différence des amplitudes sous forme de ratio et on construit un vecteur caractéristique pour chaque défaut désigné. Le vecteur est présenté sous forme de graphes avec un spectre jusqu'à 5000 Hz comme le montre la figure suivante :

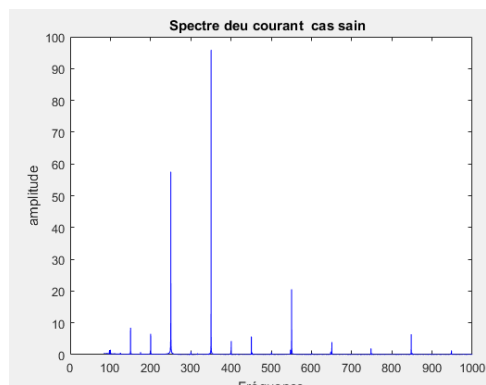


Figure III.2: Spectre d'une pompe en bonne état

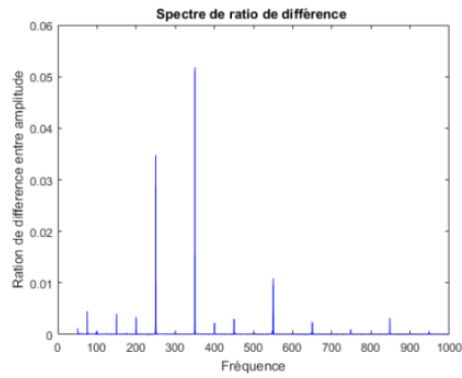


Figure III.3 : Spectre du ratio pour un cas de défaut

On remarque que l'information se situe dans une bande de basse fréquence de 60 à 1000 Hz. On refait l'analyse sur cette bande comme la montre les figures suivantes :

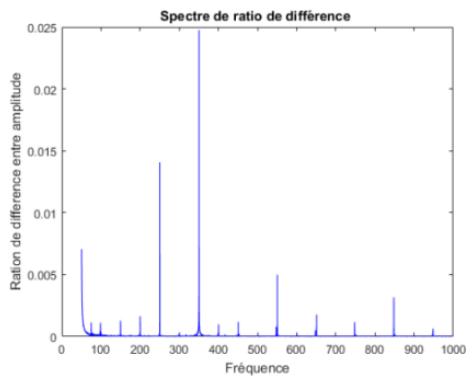


Figure III.4 : Spectre du défaut d'obturation partielle

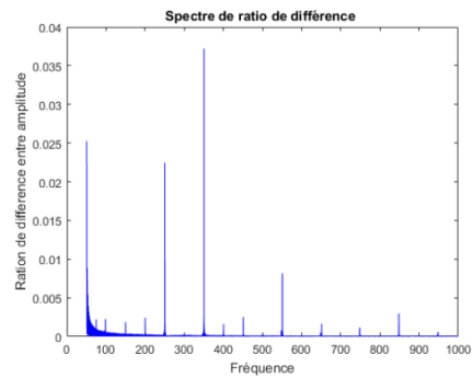


Figure III.5 : Spectre du défaut d'obturation totale

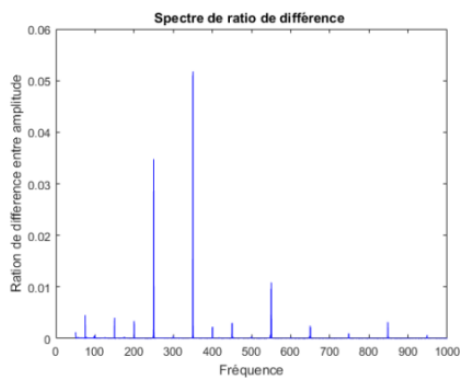


Figure III.6 Spectre du défaut sans charge

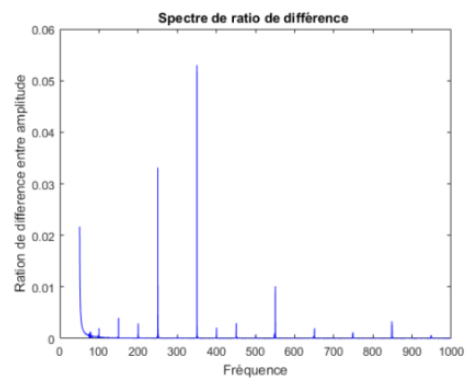


Figure III.7 : Spectre du défaut marche à sec

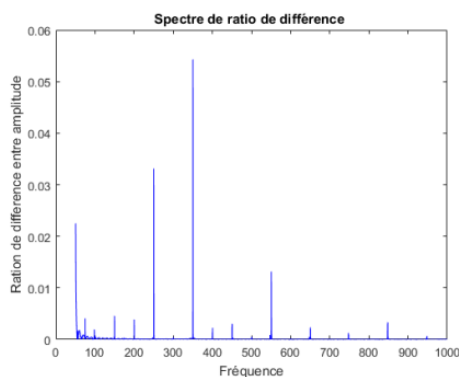


Figure III.8 : Spectre du défaut de désalignement

**Remarque:**

Les formes des spectres qui se situent dans la bande de 60 à 1000 Hz sont difficilement distinguables d'un défaut à un autre et le ratio des différences d'amplitudes est très faible.

**Commentaire :**

On cas ou on est en présence des bruits importants cette différence sera noyée dans ce bruit et devienne difficilement récupérable.

On peut remarquer aussi une distinction entre les différents spectres dans la zone de 80 à 200 hertz. Une nouvelle analyse est effectuée dans cette bande qui montre les spectres suivants :

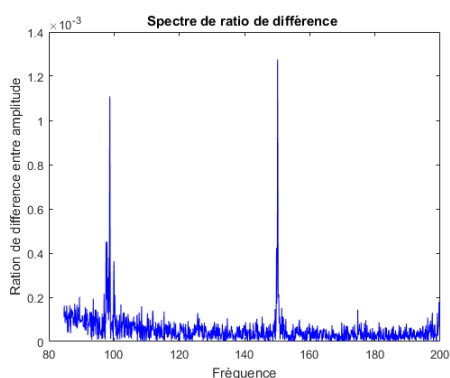


Figure III.9 : spectre de 80 à 200 Hertz défaut obturation partielle

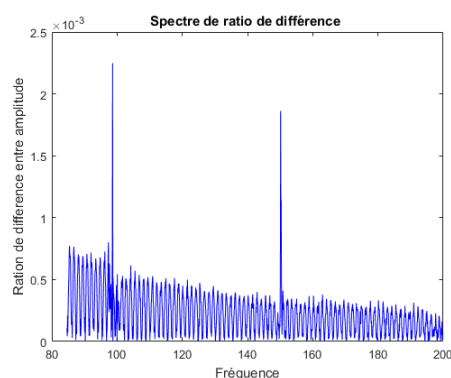


Figure III.10 : spectre de 80 à 200 Hertz défaut obturation totale

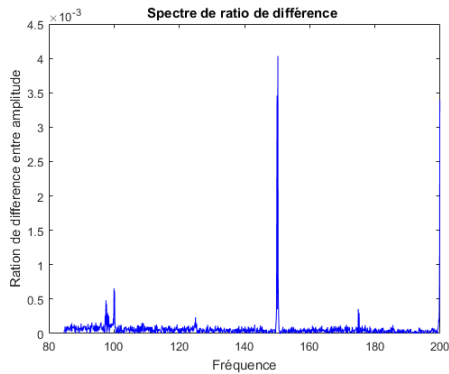


Figure III.11 : spectre de 80 à 200 Hertz défaut marche sans charge

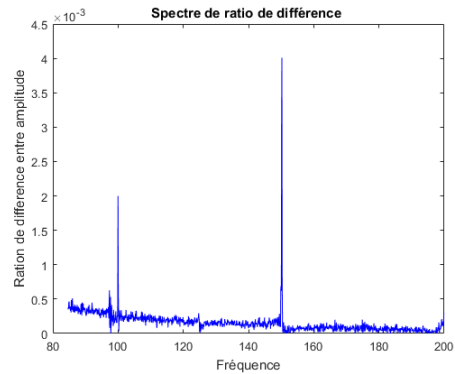


Figure III.12 : spectre de 80 à 200 Hertz défaut de marche à sec

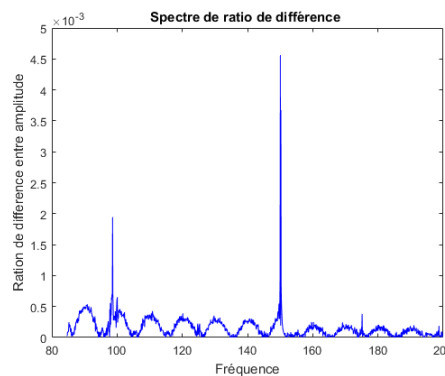


Figure III.13 : spectre de 80 à 200 Hertz défaut de désalignement

### Remarque :

On remarque qu'il y a des différentes formes de spectre pour les défauts d'obturations partielles et totales et le défaut de désalignement mais le ratio est extrêmement faible.

### Commentaire :

Des techniques de classification et de reconnaissance de formes de l'apprentissage machine peuvent être utilisées pour la distinction des défauts à ce niveau mais on a opté dans cette étude pour une autre technique qui se base sur un extracteur de critère.

### Conclusion :

Les métriques spectrales ne suffisent pas pour le diagnostic des défauts des pompes et ils ne sont exploitables que dans des cas de présence d'un modèle mathématique du défaut ce qui n'est pas le cas pour les défauts choisis dans cette étude.

### III.4 Diagnostic électrique des formes de Lissajous du vecteur de Park :

L'intérêt de cette technique est d'appliquer un diagnostic des défauts là où les métriques spectrales sont difficilement différentiable. Les figures suivantes illustrent les formes de Lissajous du vecteur de Park de l'état sain et des états en défauts proposés dans cette étude.

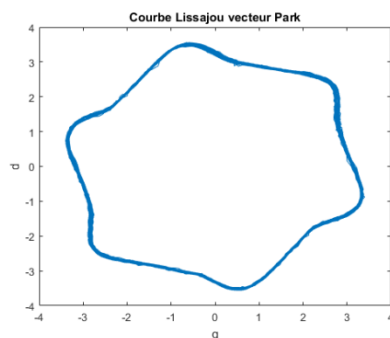


Figure III.14 : Forme de Lissajous de la pompe en bonne état

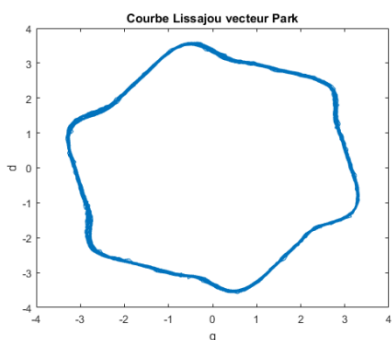


Figure III.15 : Forme de Lissajous du Vecteur Park pour Défaut de d'obturation partielle

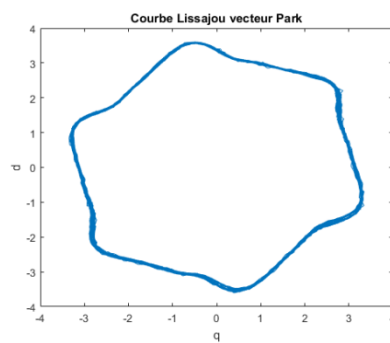


Figure III.16 : Forme de Lissajous du Vecteur Park pour Défaut d'obturation total

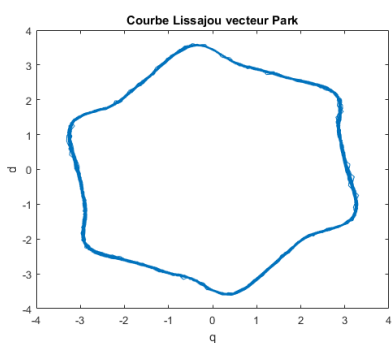


Figure III.17 : Forme de Lissajous du Vecteur Park pour Défaut de marche sans charge

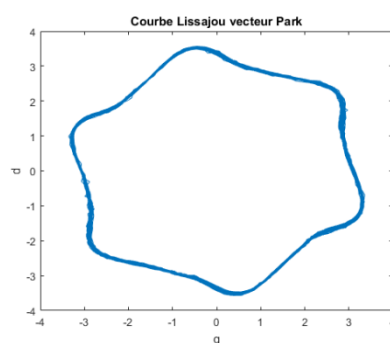


Figure III.18: Forme de Lissajous du Vecteur Park pour Défaut marche à sec

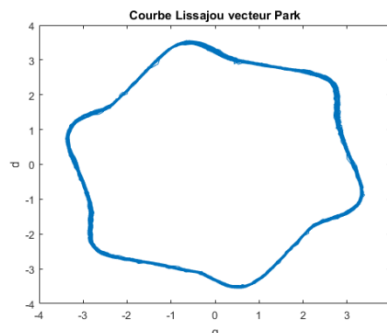


Figure III.19: Forme de Lissajous du Vecteur Park pour Défaut désalignement

**Remarque :**

On remarque que les formes sont non distinguables à l’œil nue mais le facteur de fraction ‘C’ présente des valeurs plus significatives par rapport à la technique MCA comme le montre le tableau suivant :

**Table III.1 : Facteur de fraction en relation avec les défauts**

Défaut	Facteur de fraction ‘C’	Facteur pompe saine ‘C <sub>s</sub> ’	Facteur de défaut relatif ‘C <sub>r</sub> ’
Obturation partielle	14.13	12.52	1.13
Obturation total	13.9	12.52	1.11
Marche sans charge	126.13	12.52	10.10
Marche à sec	19.8	12.52	1.58
Désalignement	25.18	12.52	2.10

On peut donc baser sur le facteur de fraction ‘C’ pour la distinction des défauts.

**Commentaire :**

Les valeurs du facteur de fraction ‘C’ sont absolus et on a besoin d’un indicateur d’état sain ‘C<sub>s</sub>’ pour les rendre plus significatives.

Le facteur de défaut relatif Cr est introduit ici comme une information de plus qui représente des fractions calculées par rapport à un état sain qui n’est pas idéal.

Néanmoins les défauts de l’obturation total et partielle restent critique; cela est dû à la simulation qui a eu lieu avec une hauteur manométrique peut importante par rapport à la hauteur manométrique au niveau de l’unité de déminéralisation.

### III.5 Conclusion :

La technique MCA est une technique conventionnelle dans le diagnostic des machines tournantes et elle fait partie des techniques non intrusives qui évite les inconvénients du montage et démontage des capteurs directement sur la pompe.

On a utilisé cette technique dans le en se basant sur des métriques spectrales qui consistent un vecteur de ratio d'amplitude entre un cas sain et un autre en défaut présentés sous forme de graphe, mais les résultats étaient difficilement distinguables dans la bande de (60Hz à 1000Hz) ; Par contre les résultats étaient visuellement distinguables dans la bande de (80Hz à 200Hz) mais le ratio était extrêmement faible.

La technique MCA basé seulement sur les métriques spectral est mieux orientés vers les défauts avec modèle ce qui n'est pas le cas pour les défauts étudiés dans cette expérience.

La deuxième technique est une technique récente par rapport à la technique visuelle des formes de Lissajous, elle introduit un facteur de fraction qui traduit les déformations des motifs en relation avec les défauts.

Cette technique a donnée des résultats distinguables par rapport à la technique MCA.

Le défaut d'absence de charge est détectable par les deux techniques et encore mieux distinguable dans la technique des formes de Lissajous de Park avec un facteur de fraction très élevé.

Les défauts d'obturation partielle et totale des tuyaux sont diagnostiqués dans des conditions de hauteur manométrique très faible par rapport aux hauteurs manométriques des pompes de l'unité de déminéralisation mais nous avons conclues que même dans ces conditions le facteur de fraction porté une information relativement significative.

# Conclusion général

## Conclusion général :

Cette thèse s'inscrit dans le cadre du diagnostic des défauts des pompes centrifuges entraînées par les moteurs asynchrones triphasés.

Deux techniques ont été utilisées : la première technique (MCA) qui est une technique conventionnelle a données des résultats difficilement distinguables mais les résultats de la deuxième technique qui est la technique nouvelle des formes de Lissajous des vecteurs de Park étaient mieux significatifs par rapport aux défauts étudiés.

Nous avons conclu ce travail par une étude expérimentale au niveau du laboratoire LEVRES de l'université Hama Lakhdar d'El-Oued dont les résultats expérimentaux nous ont aidés à comprendre et à confirmer l'utilité des techniques de diagnostic choisis dans cette étude pour les orienter vers le diagnostic des pompes de l'unité de déminéralisation d'eau salée et détecter des éventuels défauts à son niveau et d'ouvrir aussi le champ aux étudiants pour continuer dans ce domaine.

Des propositions pour donner suite à cette étude se présentent par deux cas de figures : Pour la technique MCA un classificateur de la famille des techniques d'apprentissage machine peut être utilisé pour la distinction entre les spectres ; et pour la technique des formes de Lissajous du vecteur de Park un modèle statistique des défauts à base du critère de fraction peut être aussi utilisé dans le même contexte.

À l'avenir, la portée de notre étude sur le diagnostic des pompes de la station de déminéralisation d'eau sera élargie, et l'étude sera également projetée sur cette unité en introduisant d'autres techniques avancées.

# Annexes

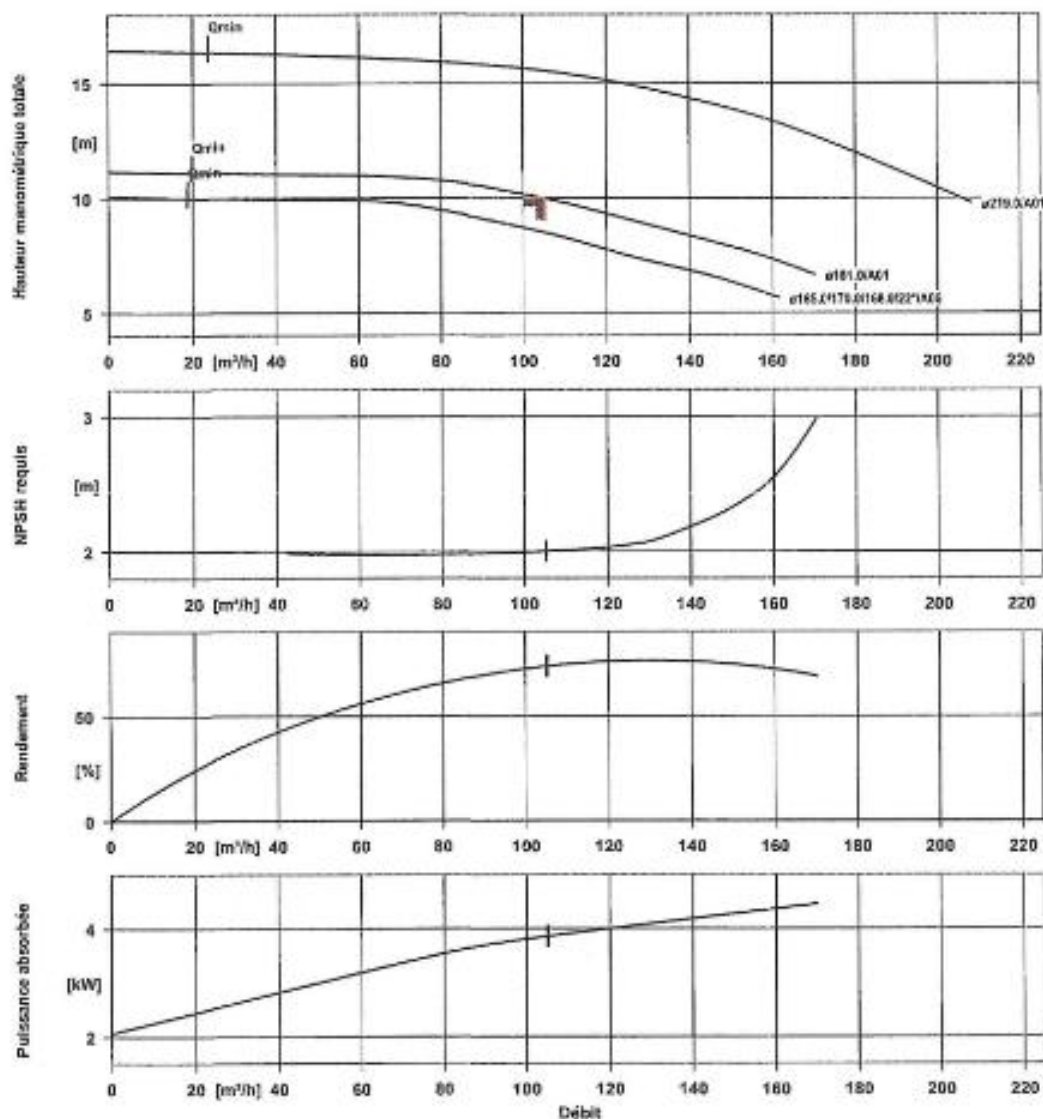
# Fiche technique d'une pompe KSB de l'unité de déminéralisation

N° de poste client:03  
 Date de communication:  
 Nr de doc.:  
 Quantité: 4

Numéro: ES 5649424  
 Poste:100  
 Date: 31/01/2018  
 Page: 3 / 5

**ETN 125-100-200 CCSAA07GD300554B**  
 Pompe centrifuge basse pression Etanorm

No. de version: 1



### Caractéristiques de courbe

Vitesse de rotation	1477 rpm	Rendement	73,8 %
Densité liquide pompé	995 kg/m <sup>3</sup>	MEI (indice de rendement minimum)	= 0,40
Viscosité	0,80 mm <sup>2</sup> /s	Puissance absorbée	3,86 kW
Débit	105,01 m <sup>3</sup> /h	NPSH requis	2,00 m
Débit demandé	105,00 m <sup>3</sup> /h	Numéro de courbe	K1311.454/46
Hauteur manométrique totale	10,00 m	Diamètre de roue effectif	181,0 mm
Hauteur manométrique totale demandée	10,00 m		

Figure A.1 : Fiche technique Pompe KSB de la station de déminéralisation d'eau sal [3]

## Table de calcul des parte de charge :

Table A.1 : Perte des charges d'une pompe centrifuge

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

## Bibliographie des références

- [1]. **Introduction à la maintenance prédictive**. Mathworks. [En ligne] [Citation : Vendredi Juin 2022.] <https://fr.mathworks.com/discovery/predictive-maintenance-matlab.html>.
- [2]. **MEMOIRE TECHNIQUE DU PROCEDE DE DEMINERALISATION. ETUDE ET REALISATION D'UNE STATION DE DEMINERALISATION D'EAU POUR L'AEP DE LA VILLE D'EL OUED**. Eloued : s.n., 2017.
- [4]. **Pompe à Eau. Made-in-china**. [En ligne] [Citation : 19 6 2022.] [https://fr.made-in-china.com/co\\_guanshenpump/product\\_304-316L-Corrosion-Resistance-Horizontal-Centrifugal-Pump-for-Sewage-Chemical-Oil\\_uoeeeggnggeg.html](https://fr.made-in-china.com/co_guanshenpump/product_304-316L-Corrosion-Resistance-Horizontal-Centrifugal-Pump-for-Sewage-Chemical-Oil_uoeeeggnggeg.html).
- [5]. **Know and Understand Centrifugal Pumps. p. 20**. Larry Bachus.
- [6]. **Know and Understand Centrifugal Pumps. p. 21**. Larry Bachus.
- [7]. Server, KSB Suprem. **Pumpkillers Data**. [www.scribd.com](http://www.scribd.com). [En ligne] [Citation : 13 juin 2022.] <https://www.scribd.com/document/450730440/pumpkillers-data-pdf>.
- [8]. **KSB SupremeServ**. Mesmaeker, Wim De. Belgium S.A.
- [9]. **A Survey of Fault Diagnosis and Fault-Tolerant echniques—Part I: Fault Diagnosis With Model-Based and Signal-Based Approaches**. Zhiwei Gao, Senior Member, IEEE, Carlo Cecati, Fellow, IEEE, and Steven X. Ding. 6, s.l. : IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2015, Vol. 62.
- [10]. **A Survey of Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Techniques—Part II: Fault Diagnosis With Knowledge-Based and Hybrid/Active Approaches**. Zhiwei Gao, Senior Member, IEEE, Carlo Cecati, Fellow, IEEE, and Steven X. Ding. 6, s.l. : IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2015, Vol. 62.
- [11]. Brunton, Steve. <https://www.youtube.com/c/Eigensteve/playlists>. *youtube*. [En ligne]
- [12]. —. Steve Brunton. [www.youtube.com/c/Eigensteve](http://www.youtube.com/c/Eigensteve). [En ligne] <https://www.youtube.com>
- [13]. **Surveillance et diagnostic des défauts rotoriques**. Mohamed El Kamel Oumaamar, Université de Lorraine,. s.l. : HAL Open Science, 2018.
- [14]. **Design of a Novel Electric Diagnostic Technique for Fault Analysis of Centrifugal Pumps**. Muhammad Irfan, Electrical Engineering Department, College of Engineering et Alwadie A Department of Automatic, Control and Robotics, AGH University of Science and Technology,30-059 Kraków, Poland. 2019, applied science.
- [18]. **Centrifugal Pump Handbook**. Sulzer Pumps Ltd Winterthur, Switzerland. Third edition. s.l. : ELSEVIER, 2010. p. 4. For information on all Butterworth-Heinemann publications.
- [19]. **Fault Detection of Circulation Pumps on the Basis of Motor Current Evaluation**. incent Becker, Thilo Schwamm, Sven Urschel , Member, IEEE,. [éd.] IEEE. 5 septembre 2021, TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS,, p. 4617.

- [20]. ***Fault Investigation of Circulation Pumps to Detect Impeller Clogging***. niversity of Applied Sciences Kaiserslautern, Schoenstraße 11, 67659 Kaiserslautern, Germany et al. s.l. : MDPI, 2020.
- [21]. ***Fault Diagnosis of Induction Motor Using MCSA and FFT***. Wooi ping Hew, University of Malaya | UM · UM Power Energy Dedicated Advanced Centre (UMPEDAC) et al. [éd.] ResearchGate. 2011.
- [22]. ***Know and Understand Centrifugal Pumps***. Custodio, Larry Bachus and Angel. UK : ELSEVIER, 2003. p. 19.
- [23]. ***Fault Diagnosis of Induction Motor Using MCSA and FFT***. Wooi ping Hew, University of Malaya | UM · UM Power Energy Dedicated Advanced Centre (UMPEDAC),al.. s.l. : Electrical and Electronic Engineering, 2012.
- [24]. ***Diagnostic de panne d'un moteur à induction triphasé à l'aide d'un signal de courant, MSAF Ratio15 et classificateurs sélectionnés***. Adam Glowacz, AGH University of Science and Technology in Kraków | AGH · Department of Automatic Control and Robotics, Zygfryd Glowacz, AGH University of Science and Technology in Kraków | AGH · Departmeny of Power Electronics and Energy Control Systems et al. 2017, ResearchGate.