

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université A. MIRA-BEJAIA

Faculté
Technologie



Département de
Génie Électrique

MEMOIRE
EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER

Filière: Électromécanique

Spécialité : Électromécanique

Thème

**Entrainement d'une pompe centrifuge à vitesse
variable pour réduire la consommation d'énergie**

Devant le jury:

Encadrant: Mr TAMALOUZT

Co-encadrant : Mr KHELIFA .N

Examineur : Mr TAREFT.S

Président: Mr HAMASSE.A

Réalisé par:

DAOUD Tinhinane

DJAHNINE Mohand-Ali

Année Universitaire: 2023/2024

Dédicace

J'ai toujours voulu faire ou offrir quelque chose à mes parents en signe de reconnaissance pour tous les efforts qu'ils ont consentis afin de me voir réussir, et voici enfin l'occasion.

À ceux qui m'ont donné la vie, symboles de beauté, de fierté et de sagesse.

À ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois amour et gratitude.

À mes chers parents, lumière de ma vie.

À mes chers Frères Imad et Arselane (Habib) et mes beaux frères (Loucif, Fékir et Sofiane) et mes chères sœurs Siham, Radia, Ghezlane, Nihad, Nesrine.

A mes chères nièces Dima et Ayla et mon cher neveu Amine.

À ma chère grand-mère et toute ma famille

À mon binôme Tinhinane.

À toute personne qui occupe une place dans mon cœur.

Dédicace

J'ai toujours voulu faire ou offrir quelque chose à mes parents en signe de reconnaissance pour tous les efforts qu'ils ont consentis afin de me voir réussir, et voici enfin l'occasion.

À ceux qui m'ont donné la vie, symboles de beauté, de fierté et de sagesse.

À ceux qui sont la source de mon inspiration et de mon courage, à qui je dois amour et gratitude.

À mes chers parents, lumière de ma vie.

À mes sœurs FOUZIA, SOUHILA, ZOULIKHA, LAMIA, AMIRA et AYA.

À mon binôme Mohand- Ali.

À mes copines SYLIA, THIZIRI, AMIRA, CELIA, DALICIA, LYDIA, TISSIA.

À tous mes amis de l'Université de Bejaia.

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à exprimer notre gratitude à ALLAH, le Tout-Puissant, pour nous avoir donné la force de mener à bien ce travail.

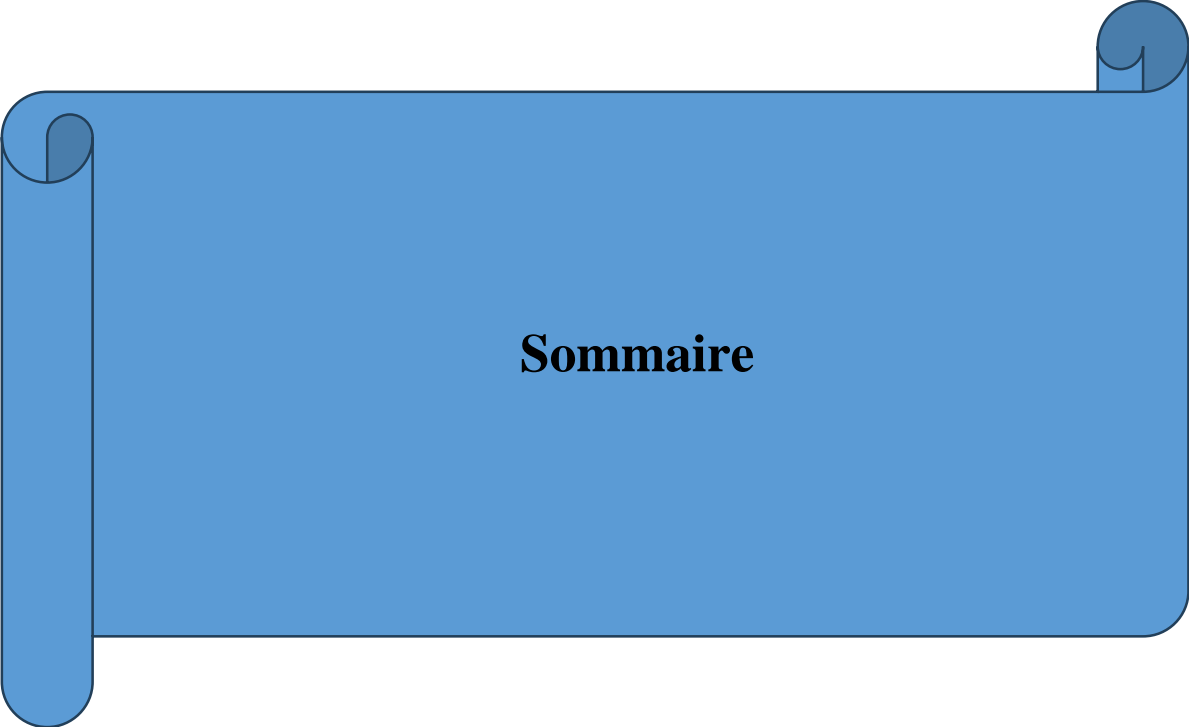
Nous souhaitons également exprimer notre profonde reconnaissance à Mr. TAMALOUZT SALEH pour avoir accepté de nous encadrer, ainsi que pour son aide et ses encouragements tout au long de ce projet.

Nos remerciements vont également aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail.

Nous adressons un grand merci aux enseignants, aux responsables et au personnel du département de génie Électrotechnique pour leurs efforts inlassables tout au long de notre parcours universitaire.

Nos remerciements s'étendent aussi aux ingénieurs du complexe CEVITAL BEJAIA «NABIL KHELIFA» Et «NACER ADJIR» pour leur suivi et leur disponibilité à nous fournir les informations nécessaires.

Enfin, nous remercions tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réussite de ce travail, même s'ils ne sont pas mentionnés ici



Sommaire

Dédicace**Remerciement****Liste des figures****Liste des tableaux****Introduction générale****CHAPITRE I : Généralité sur les pompes.**

I.1 Introduction :	2
I.1.1 Présentaion de complexe Cevital :	2
I.1.1.2 Cevital Agro-industrie :	2
I.1.1.3 Situation géographique :	3
I.1.1.4 Activites de Cevital :	3
I.1.1.5 Missions et objectifs :	4
I.1.1.6 Organisation de l'entreprise.....	5
I.1.2 Unite de conditionnement de sucre Cevital :	5
I.2 Definition :	6
I.3 Types DES Pompes :	6
1.3.1 Pompe volumetrique :	7
1.3.1.1 Pompes volumétriques alternatives :	7
1.3.1.1.1 Pompes à piston :	7
1.3.1.1.2 Pompes à membranes ou à soufflets :	8
1.3.1.1.2 Pompes volumétrique rotatives :	9
1.3.1.1.2.1 Pompes à engrenages :	9
1.3.1.1.2.2 Pompes à vis :	10
1.3.1.1.2.3 Pompes à palettes :	11
1.3.1.1.2.4 Pompes à lobes :	12
I.3.2 Pompes roto-dynamique (turbopompe) :	12
I.3.2.1 Pompes hélico-centrifuges :	15
I.3.2.2 Pompes hélices :	15
I.3.2.3 Pompes centrifuges :	15
I.4 Les Pompes centrifuges :	16

I.4.1 Composante d'une pompe centrifuge :	16
I.4.1.1 Eléments internes :	16
I.4.1.2 Eléments externes :	17
I.4.2 Principes de fonctionnement :	17
I.4.3 Utilisation :	18
I.4.4 Equipements d'installation de la pompe centrifuge :	18
I.4.4.1 Equipements d'aspiration de conduit (amont) :	18
I.4.4.2 Equipements de refoulement de conduit (aval) :	20
I.5 Avantages et inconvénients de la pompe centrifuge :	21
I.6 Theorie des pompes centrifuges :	21
I.6.1 Critères généraux de Définition des pompes :	21
I.6.2 Pertes de charge:	22
I.6.3 Rendement de pompe centrifuge :	23
I.6.4 Hauteur manometrique totale de la pompe :	23
I.6.5 Npsh (Net Positive Succion Head):	23
I.7 Point de fonctionnement :	24
I.8 Conclusion :	25
CHAPITRE II : Utilisation de variateur de vitesse pour une pompe centrifuge	
II.1 Introduction :	26
II.2 Interface entre les pompes et les variateurs de vitesse :	26
II.3 Variateur de vitesse :	26
II.3.1 Définition:	26
II.3.2 Composition des variateurs de vitesse:	27
II.3.3 Fonctionnement du variateur de vitesse :	27
II.3.4 Pourquoi on utilise un variateur de vitesse ?	29
II.3.5 Critères de choix d'un variateur :	29
1. Facteurs technique :	29
2. Facteurs économique :	29
II.3.6 Méthodes de réglages de débit d'une pompe centrifuge :	29
II.3.7 Effets de la variation de vitesse sur les pompes centrifuges :	35

II.3.8 Effets de la variation de vitesse sur les moteurs :	36
II.4 Importance de la vitesse variable dans le fonctionnement des pompe centrifuges :.	36
II.5 Avantages de l'utilisation d'un variateur de vitesse pour réduire la consommation d'énergie :	37
II.6 Conclusion :	37
CHAPITRE III :Verification et calcul de la pompe KSB	
III-1 Introduction :	39
III.1.1 Description du groupe électropompe :	39
III. 1.1.1 Moteurs :	40
III.1.1.2 Descriptif du moteur d'un point de vue mécanique :	40
III.1.1.2 Principe de fonctionnement :	40
III.1.1.4 Caractéristiques techniques de Moteur d'entraînement :	42
III.1.1.5 Couplage des enroulements :	42
III-2 Description de la pompe CPK S1 100-315 (P161A) :	44
III.3 Calcul hydraulique :	44
III.3.1 Interprétation :	47
III.4 Conclusion :	48
 CHAPITRE IV : Analyse de fiabilité et optimisation de la maintenance préventive	
IV.1 Introduction :	50
IV.1.1 Généralités sur la maintenance :	50
IV.1.1.1 Définition :	50
IV.1.1.2 Rôle de la maintenance :	50
IV.1.1.3 types de maintenance :	50
IV.1.1.3.1 Maintenance préventive :	51
IV.1.1.3.2 Maintenance corrective:	51
IV.1.1.2 Objectifs opérationnels de la maintenance :	52
IV.2 Généralités sur la fiabilité :	52
IV.2.1 Définition :	52

IV.2.2 Fonctions de répartition et de fiabilité :	52
IV.2.3 Principales lois de Probabilités utilisées en fiabilité :	53
IV.2.3.1 Loi exponentielle :	53
IV.2.3.2 Loi normal :	53
IV.2.3.2.1 Notions fondamentales :	54
IV.2.3.3 Loi gamma :	54
IV.2.3.4 Loi de weibull :	54
IV.2.3.4.1 Paramètres de la loi de weibull	54
IV.2.3.4.2 Caractéristiques d'une variable aléatoire distribuée par loi de weibull :	55
IV.2.3.4.3 Estimation de la fonction de survie :	56
IV.2.4 Exploitation de l'historique :	57
IV.3 Partie calcul :	59
IV.3.1 Calcul de fiabilité :	59
IV.3.1.1 Calcul des paramètres de weibull :	59
IV.3.1.2 Calcul de l'espérance mathématique $E(T)$:	62
IV.3.1.3 Application des lois de weibull :	62
IV.3.1.4 Interprétation :	63
IV.3.1.5 Interprétation :	64
IV.4 Conclusion :	64

Conclusion générale

Référence bibliographiques

Annexes

Liste des figures :

CHAPITRE I : Généralité sur les pompes.

Figure I.1 : Situation géographique du complexe CEVITAL.....	3
Figure I.2: Organisme du complexe CEVITAL.....	5
Figure I.3 : Types des pompes	6
Figure I.4 : Pompe à piston.....	7
Figure I.5 : Pompes à membranes.....	8
Figure I.6 : Pompes à engrenages extérieurs	9
Figure I.7 : Pompes à engrenages extérieurs.....	10
Figure I.8 : Pompes à vis.....	10
Figure I.9 : Pompes à palette.....	10
Figure I.10 : Pompes à lobes.....	11
Figure I.11 : Représentation des domaines respectifs des trois types de pompes roto-dynamiques.	12
Figure I.12: Domaines d'utilisation des pompes industrielles roto-dynamique.....	12
Figure I.13 : Pompe centrifuge monocellulaire en porte à faux.....	12
Figure I.14 : Pompe multicellulaire.....	13
Figure I.15 : Roues mobiles de machines centrifuge, hélico centrifuge et axiale.....	13
Figure I.16 : Domaine d'utilisation des pompes.....	14
Figure I.17 : Pompe hélico-centrifuges monté sur une surface.....	14
Figure I.18 : Pompe hélices.....	15
Figure I.19 : Pompe centrifuge.....	15
Figure I.20 : Schéma d'une pompe centrifuge.....	16
Figure I.21: Schéma d'une pompe centrifuge à roue.....	17
Figure I.22 : Evolution de la vitesse et de la pression dans la pompe.....	18
Figure I.23 : joints et coudes.....	19
Figure I.24 : Simple collecteur d'aspiration.....	19
Figure I.25 : Vanne d'aspiration.....	19

Figure I.26 : Exemple un Convergent.....	20
Figure I.27: Equipement en aspiration et en refoulement d'une pompe.....	21
Figure I.28: Détermination de point de fonctionnement.....	24
CHAPITRE II : Utilisation de variateur de vitesse pour une pompe centrifuge	
Figure II.1 : Variateur de vitesse.....	27
Figure II.2: Schéma de fonctionnement du Variateur de vitesse.....	28
Figure II.3 : Schéma avec vanne de laminage.....	30
Figure II.4 : Courbes caractéristiques pompes et puissance absorbée.....	30
Figure II.5 : Schéma d'une régulation par by-pass.....	31
Figure II.4: Courbes caractéristiques pompe et puissance absorbée.....	
Figure II.6: Courbes caractéristiques pompe, puissance absorbée et rendement pour une deux ou trois pompes en parallèle.....	32
Figure II.7: Courbe caractéristique pompe et puissance absorbée.....	33
Figure II.8: Fonctionnement d'une pompe réglée avec différentes courbes de réseau.....	35
Figure II.9 : Courbes caractéristiques pour différentes fréquences.....	36
CHAPITRE III : Vérification et calcul de la pompe Ksb	
Figure III.1: Schématisation d'un groupe électropompe.....	39
Figure III.2: Illustration d'un moteur asynchrone triphasé en coupe.....	40
Figure III.3 : Schéma représentant le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil.....	41
Figure III.4: Plaque à borne.....	43
Figure III.5: Couplage de l'enroulement.....	42
Figure III.6 : Vue l'ensemble de l'accouplement.....	44
Figure III.7: Pompe centrifuge P161A.....	44
CHAPITRE IV : Analyse de fiabilité et optimisation de la maintenance préventive	
Figure IV.1: Annexe A de la norme NF EN 13306 X 60-319 de juin 2001.....	49
Figure IV. 2: Fonction de densité de probabilité - Loi exponentielle.....	52
Figure IV.3 : Variation de l'évolution du taux instantané en fonction de β - Loi de Weibull.....	54
Figure IV.4: Papier de weibull.....	59

Figure IV.5: Graphe du taux de défaillance en fonction du temps.....	63
--	----

Liste des tableaux

CHAPITRE III : Vérification et calcul de la pompe Ksb

Tableau III.1 : Plaque signalétique du moteur asynchrone.....	42
---	----

CHAPITRE IV : Analyse de fiabilité et optimisation de la maintenance préventive

Tableau IV .1 : L'historique de panne de la pompe P161A.....	56-57-58
--	----------

Tableau IV .2 : Les TBFi classés en ordre.....	60
--	----

Tableau IV .3: Les TBFi et les taux de défaillance $\lambda(t)$	62-63
---	-------



Introduction générale

Introduction général

Les pompes jouent un rôle fondamental dans de nombreux secteurs industriels, allant de l'approvisionnement en eau et du traitement des eaux usées à la production d'énergie et aux procédés manufacturiers. Parmi les divers types de pompes, les pompes centrifuges se distinguent par leur efficacité, leur fiabilité et leur large gamme d'applications. Ce mémoire se concentre sur la description des pompes centrifuges, en mettant en évidence leur fonctionnement, leurs performances et leurs applications pratiques.

L'objectif principal de ce mémoire est de comprendre l'utilisation des pompes centrifuges, en particulier par l'intégration de variateurs de vitesse. Les variateurs de vitesse permettent de contrôler la vitesse des moteurs électriques des pompes, offrant ainsi une flexibilité et une efficacité accrues. Cette gestion optimisée de la vitesse conduit à une amélioration significative de la performance énergétique, une réduction des coûts d'exploitation, et une prolongation de la durée de vie des équipements.

Une partie essentielle de cette étude comprend l'analyse technique de l'intégration des variateurs de vitesse, couvrant les connexions physiques et électriques, les modes de contrôle, et les stratégies de maintenance. À travers une étude de cas détaillée de la pompe KSB, ce mémoire évalue les performances théoriques et pratiques de cette pompe, démontrant son efficacité dans une application industrielle spécifique, telle qu'une unité de production de sucre.

En outre, ce mémoire propose un cadre méthodologique pour l'analyse de la fiabilité et l'optimisation de la maintenance préventive des pompes centrifuges. En développant des stratégies de maintenance efficaces, il est possible d'améliorer la fiabilité des équipements, de réduire les coûts opérationnels et d'augmenter la sécurité des opérations.

Ainsi, ce mémoire vise à fournir une contribution significative à la compréhension et à l'amélioration des systèmes de pompage modernes. Il met en lumière les avantages technologiques des variateurs de vitesse et propose des approches pratiques pour améliorer la performance et la fiabilité des pompes centrifuges dans divers contextes industriels.

A blue scroll graphic with a white border, featuring a vertical strip on the left side and a small circular detail at the top right corner. The text is centered within the scroll.

Chapitre I : Généralité sur les pompes

I.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous commençons par aborder l'évolution historique du complexe agroalimentaire CEVITAL, en présentant sa situation géographique, ses différentes activités industrielles, et l'organigramme décrivant ses différentes directions. Ensuite, nous présenterons l'unité du conditionnement de sucre, ainsi qu'on a parlé sur généralité les pompes centrifuges.

I.1.1 Présentation de complexe CEVITAL :

Le groupe « CEVITAL » est un conglomérat algérien de l'industrie agro-alimentaire, grande distribution, automobile, industrie, services et immobilier. Fondé par l'entrepreneur Mr. ISAAD REBRAB en 1998, CEVITAL est l'une des entreprises algériennes les plus importantes par le chiffre d'affaires, et leader de l'agro-alimentaire en Afrique. Créée avec des fonds privés, le Groupe CEVITAL est un groupe familial bâti sur une histoire, un parcours et des valeurs qui en ont fait sa réussite et sa renommée. Le groupe CEVITAL a atteint aujourd'hui une taille qui lui permet d'acquérir le statut d'acteur majeur régional et continental, consacré par le rapport The African challengers de BCG, le prestigieux cabinet américain de stratégie. [1]

I.1.1.2 CEVITAL Agro-industrie :

Filiale du Groupe Ce vital créée en 1998, Ce vital Agro-industrie est le plus grand complexe privé en Algérie, et le leader en Afrique et dans le Bassin Méditerranéen dans l'industrie du sucre et de l'huile végétale. Implantée au sein du port de Bejaia, Ce vital Agro-industrie dispose de plusieurs unités de production: deux raffineries de sucre ; une unité de sucre liquide; une raffinerie d'huile ; une margarinerie ; une unité de conditionnement d'eau minérale; une unité de fabrication et de conditionnement de boisson rafraichissante et une conserverie. La possession de plusieurs silos portuaires ainsi que celle d'un terminal de déchargement portuaires d'une capacité de 2000 tonnes/heure fait de CEVITAL Agro-industrie le premier terminal de déchargement portuaire en Méditerranée. En offrant des produits de haute qualité aux consommateurs mais aussi aux industriels et ce à des prix compétitifs, Ce vital Agro-industrie exporte ses produits dans plusieurs pays et notamment en Europe, au Maghreb, au Moyen-Orient et en Afrique de l'Ouest, et compte parmi ses clients des grands noms du domaine de l'agro-business ; citons : Coca-Cola, Kraft Food, Danone... [1]

, nous présenterons l'unité du conditionnement de sucre, ainsi qu'on a parlé sur généralité les pompes centrifuges.

I.1.1 Présentation de complexe CEVITAL :

Le groupe « CEVITAL » est un conglomérat algérien de l'industrie agro-alimentaire, grande distribution, automobile, industrie, services et immobilier. Fondé par l'entrepreneur Mr. ISAAD REBRAB en 1998, CEVITAL est l'une des entreprises algériennes les plus importantes par le chiffre d'affaires, et leader de l'agro-alimentaire en Afrique. Créé avec des fonds privés, le Groupe CEVITAL est un groupe familial bâti sur une histoire, un parcours et des valeurs qui en ont fait sa réussite et sa renommée. Le groupe CEVITAL a atteint aujourd'hui une taille qui lui permet d'acquérir le statut d'acteur majeur régional et continental, consacré par le rapport The African challengers de BCG, le prestigieux cabinet américain de stratégie. .[1]

I.1.1.2 CEVITAL Agro-industrie :

Filiale du Groupe Ce vital créée en 1998, Ce vital Agro-industrie est le plus grand complexe privé en Algérie, et le leader en Afrique et dans le Bassin Méditerranéen dans l'industrie du sucre et de l'huile végétale. Implantée au sein du port de Bejaia, Ce vital Agro-industrie dispose de plusieurs unités de production: deux raffineries de sucre ; une unité de sucre liquide; une raffinerie d'huile ; une margarinerie ; une unité de conditionnement d'eau minérale; une unité de fabrication et de conditionnement de boisson rafraichissante et une conserverie. La possession de plusieurs silos portuaires ainsi que celle d'un terminal de déchargement portuaires d'une capacité de 2000 tonnes/heure fait de CEVITAL Agro-industrie le premier terminal de déchargement portuaire en Méditerranée. En offrant des produits de haute qualité



I.1.1.3 Situation géographique :

CEVITAL est implanté au niveau du nouveau quai du port de Bejaia à 3 Km du sud-ouest de cette ville, à proximité de la RN 26. Cette situation géographique de l'entreprise lui a

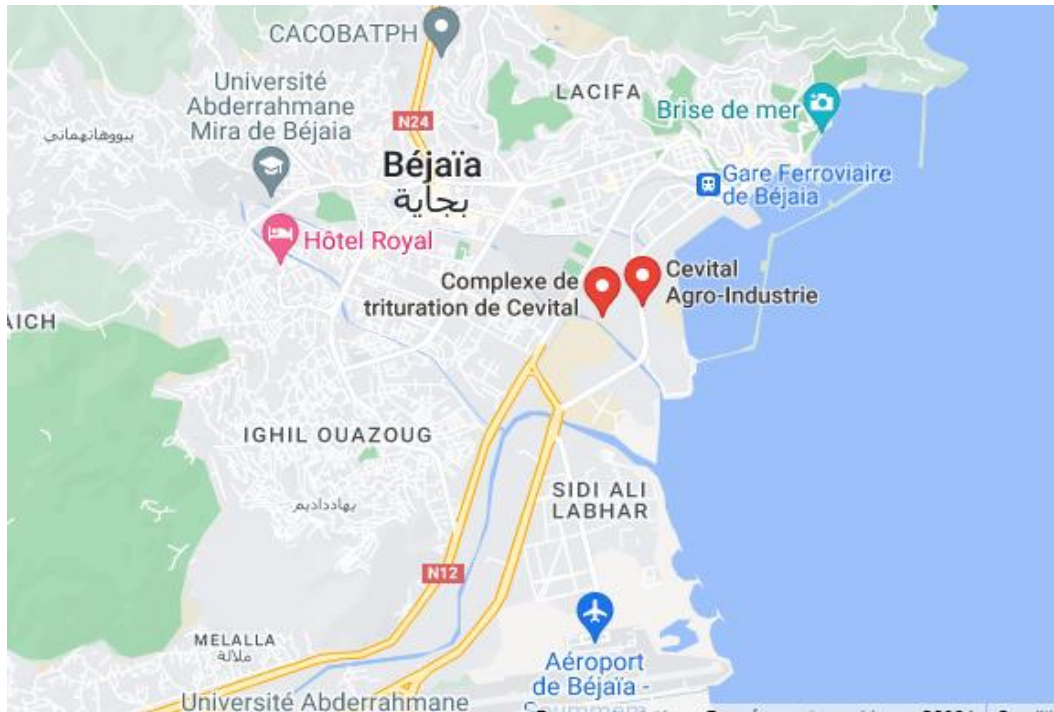


Figure I.1 : Situation géographique du complexe CEVITAL. [1]

I.1.1.4 Activités de CEVITAL :

L'ensemble des activités de Ce vital est concentré sur la production et la commercialisation des huiles végétales, de margarine et de sucre et se présente comme suit :

- Raffinage des huiles (1800 tonnes/jour).
- Conditionnement d'huile (1400 tonnes/jour).
- Production de margarine (600 tonnes/jour).
- Fabrication d'emballage (PET) ; Poly-Ethylène-Téréphtalate (9600 unités/heure).
- Raffinage de sucre (1600 tonnes/jour).
- Conditionnement de Sucre (192 tonnes/jour).
- Stockage des céréales (120000 tonnes/jour). [1]

I.1.1.5 Missions et objectifs :

- La mission principale de l'entreprise est de développer la production et d'assurer la qualité à des prix nettement plus compétitifs pour satisfaire les clients.
- Les objectifs visés par CEVITAL sont :
 - L'extension de ses produits sur tout le territoire national.
 - L'importation de graines oléagineuses pour l'extraction directe des huiles brutes.
 - L'optimisation de ses offres d'emploi sur le marché du travail.
 - L'encouragement des agriculteurs par des aides financières pour la production locale de graines oléagineuses.
 - La modernisation de ses installations en termes de machine et technique pour augmenter le volume de sa production.
 - Le positionnement de ses produits sur le marché étranger par leurs exportations.

I.1.1.6 Organisation de l'entreprise :

Le complexe compte à son effectif plus de 3600 employés (permanents et contractuels), répartis sur les différentes structures comme suit :

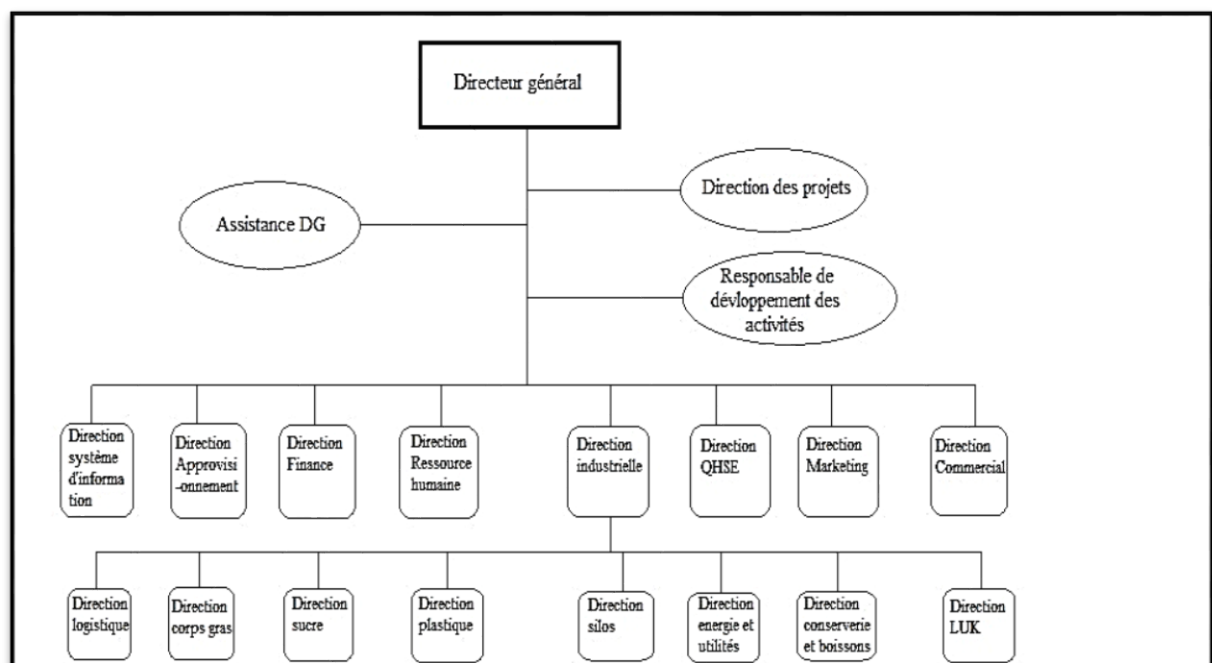


Figure I.2: Organisme du complexe CEVITAL

I.1.2 Unité de conditionnement de sucre CEVITAL :

1. Définition de conditionnement :

Le conditionnement est un emballage primaire (première enveloppe ou premier contenant). C'est-à-dire celui qui est au contact direct avec le produit. Moins orienté vers la protection contre d'éventuels agents extérieurs, le rôle du conditionnement est de :

- Protéger le contenu afin qu'il conserve toute sa qualité ;
- Faciliter l'étalage et la reconnaissance du produit dans les points de vente ;
- Captiver le choix du client parmi plusieurs produits concurrentiels ;
- Faciliter l'utilisation du produit à près achat (grâce à sa forme, ses options, son marquage...);
- Protéger le consommateur contre d'éventuels risques chimiques. .[1]

2. Description de l'unité de conditionnement de sucre Ce vital :

Le Bâtiment de conditionnement de sucre a une superficie de 1131.9 m² et effectif de 430 Employés des différents services production ; maintenance et expéditions. [1]

I.2 Définition :

On appelle pompe du nom italien « pompa » toutes machines hydrauliques qui servent à déplacer les liquides d'une région de basse pression vers une région à grande pression.

Une pompe est une machine hydraulique qui conduit et déplace un liquide (comme l'eau, l'huile, l'essence, les liquides alimentaires, etc.).

I.3 Types des pompes :

Pour répondre à toutes les applications industrielles, plusieurs types de pompes ont été inventés.

On trouve deux grandes familles :

- Les pompes hydrauliques volumétriques.
- Les pompes hydrauliques non volumétriques (roto-dynamique).

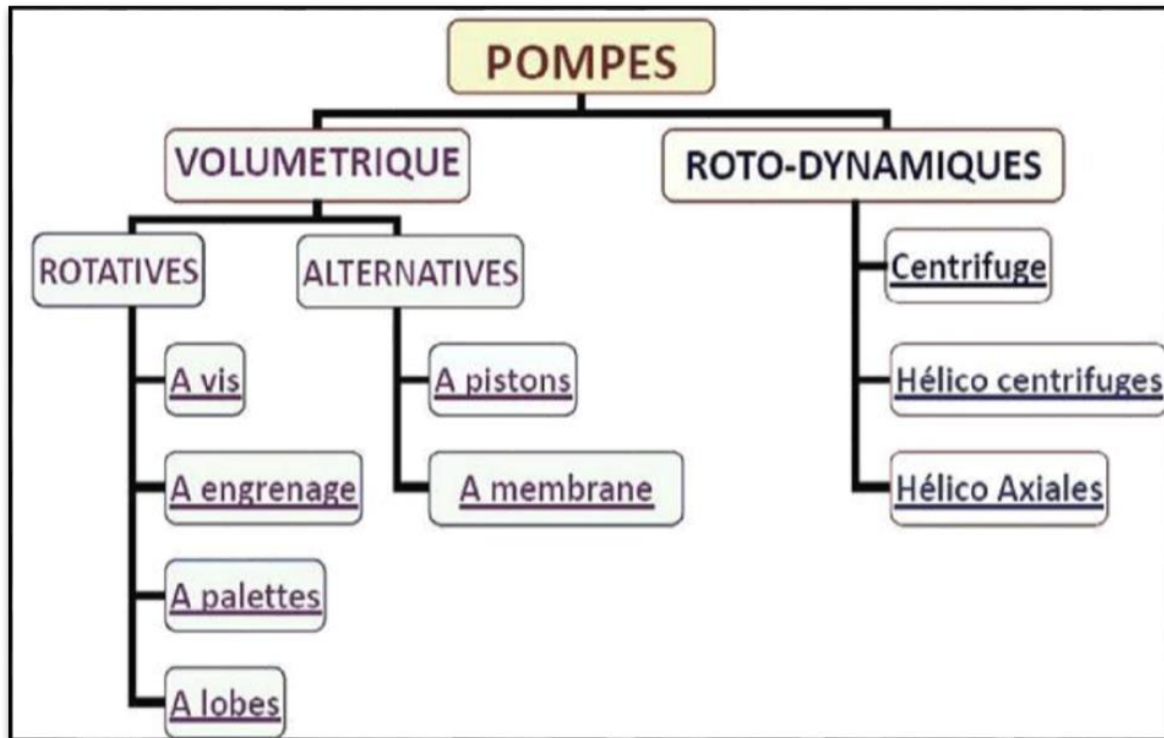


Figure I. 3 : Types des pompes [2]

1.3.1 Pompe volumétrique :

On trouve deux grandes familles de pompes volumétriques :

- Les pompes volumétriques **alternatives**.
- Les pompes volumétriques **rotatives**.

1.3.1.1 Pompes volumétriques alternatives :

Ces pompes sont caractérisées par le fait que la pièce mobile est animée d'un mouvement alternatif. Les principaux types de ces pompes sont les suivants :

- À piston.
- À membrane ou à soufflets.

1.3.1.1.1 Pompes à piston :

Les volumes engendrés à l'aspiration et au refoulement, résultent du déplacement alternatif sur son axe, d'un piston ou d'un plongeur, à l'intérieur d'un cylindre. Un temps est consacré au remplissage du cylindre (aspiration) et un temps est consacré à la vidange du cylindre (refoulement). Le débit du liquide engendré par la pompe sera donc discontinu. Lorsque le piston se déplace pour créer les conditions d'aspiration, il faut que le remplissage s'effectue avec

du liquide provenant de la tuyauterie d'aspiration. Il est nécessaire de fermer l'ouverture de refoulement et d'ouvrir l'arrivée d'aspiration. Au contraire, lors du refoulement, il faut ouvrir vers le refoulement et fermer vers l'aspiration. Ceci est réalisé par un jeu de clapets. Une pompe volumétrique alternative comportera toujours des clapets d'aspiration et d'autres au refoulement. [3]

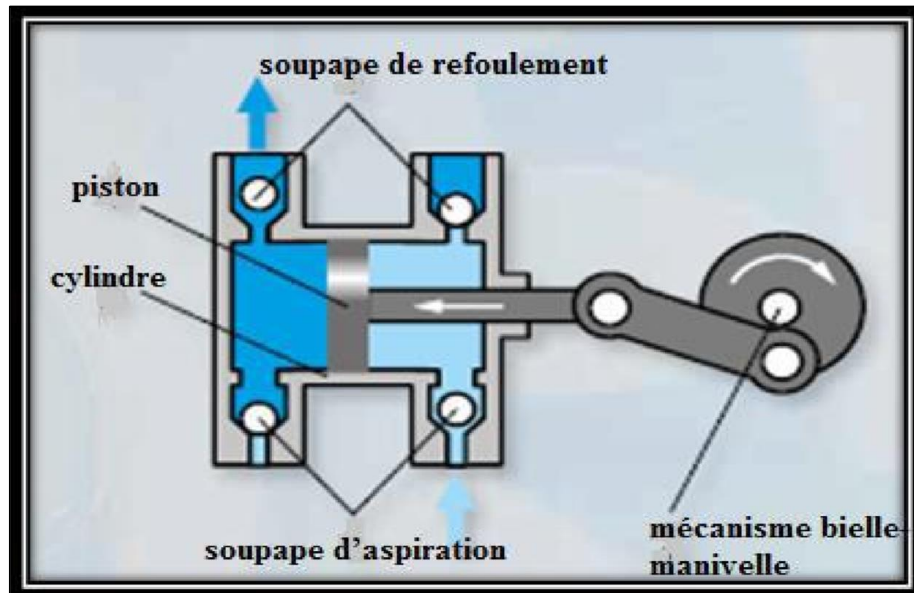


Figure I.4 : Pompe à piston

Il existe différents types de pompes à piston :

- Pompes à piston simple effet.
- Pompes à piston double effet.
- **Pompe simple effet :**

Pendant un va et vient du piston, la pompe aspire une fois et refoule une fois. [4]

- **Pompe double effet :**

Pendant le va et vient du piston, la pompe aspire deux fois et refoule deux fois. [4]

1.3.1.1.2 Pompes à membranes ou à soufflets :

Dans les pompes à membrane, appelées aussi pompes à diaphragme, le fluide n'entre pas en contact avec les éléments mobiles de la machine. Ces pompes sont donc bien adaptées au pompage des liquides corrosifs ou/et chargés de particules solides. [4]

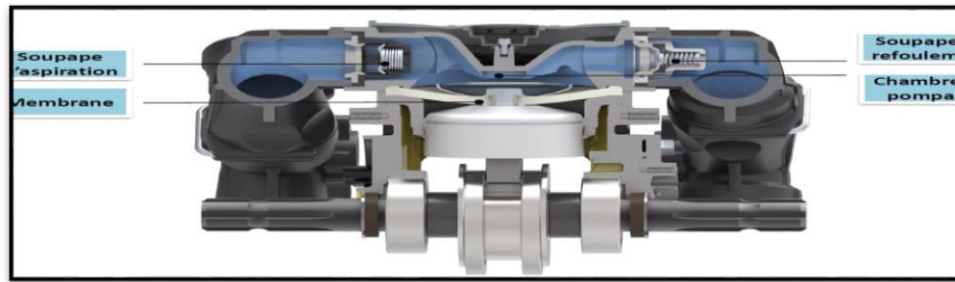


Figure I.5 : Pompes à membranes

1.3.1.1.2 Pompes volumétrique rotatives :

Les pompes hydrauliques rotatives sont équipées de parties internes en rotation qui emprisonnent le fluide au niveau de l'orifice d'entrée et le chassent au niveau de l'orifice de sortie [5]

Les principaux types des pompes rotatives sont :

- Pompes à engrenage.
- Pompes à vis.
- Pompes à lobes.
- Pompes à palettes ...etc.

1.3.1.1.2.1 Pompes à engrenages :

Une pompe à engrenage a deux ou trois roues engrenées tournant dans un carter. La roue d'entraînement est attachée à un arbre d'entraînement qui est connecté à une source d'énergie externe (Figure I.4). Elles sont très répandues et peu coûteuses parce qu'elles sont simples et économiques à utiliser. [5]

Il existe deux types des pompes à engrenages :

- Pompes à engrenages extérieure
- Pompes à engrenages intérieure

Pompes à engrenages extérieure :

Les pompes à engrenages externes sont des pompes volumétriques rotatives munies de deux lignes d'arbre, chacune équipée d'un engrenage. Elles sont utilisées pour le transfert de fluides lubrifiants exempts de particules ou de corps étrangers. Ces pompes peuvent fonctionner en entraînement direct par un moteur à différentes vitesses ou être entraînées par un motoréducteur pour des viscosités plus importantes. [6]

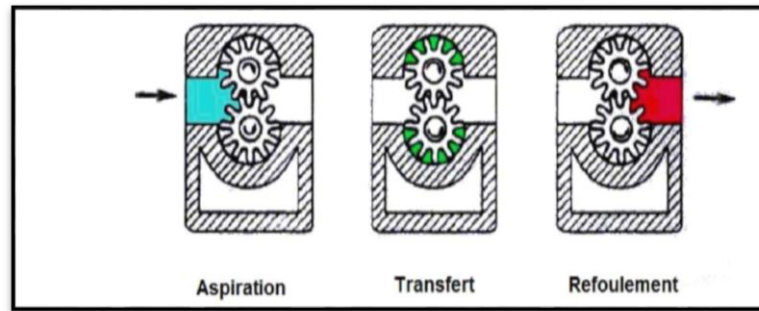


Figure I.6 : Pompes à engrenages extérieurs [5]

Pompes à engrenages intérieurs :

Les pompes à engrenages internes, telles que celles de Johnson Pump, sont des pompes volumétriques rotatives équipées d'un rotor à l'intérieur duquel est entraîné un pignon excentré. Elles sont conçues pour le transfert de liquides peu visqueux comme le gaz oïl ou fortement visqueux comme les résines. [6]

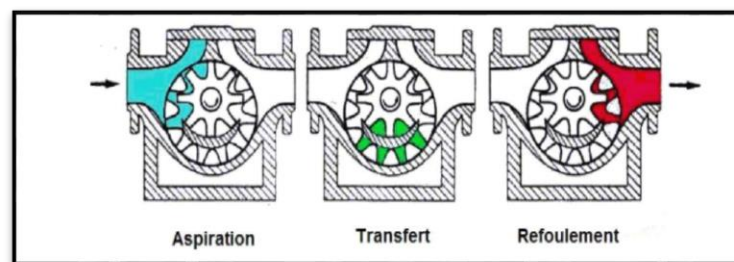


Figure I.7 : Pompes à engrenages intérieurs [5]

1.3.1.1.2 Pompes à vis :

Elles sont constituées de deux ou trois vis s'engrenant entre elles. Le liquide remplit les cavités qui existent entre les vis et le corps. Pendant la rotation des vis, les cavités se déplacent transférant ainsi du liquide de la zone d'aspiration vers la zone de refoulement. Ce type de pompe volumétrique admet une vitesse de rotation élevée (3000 tr/mn) ; elles sont silencieuses et permettent d'atteindre des pressions assez élevées (≈ 100 bar). Elles ne véhiculent que des liquides à bon pouvoir de lubrification et ne contenant pas particules abrasives [3]

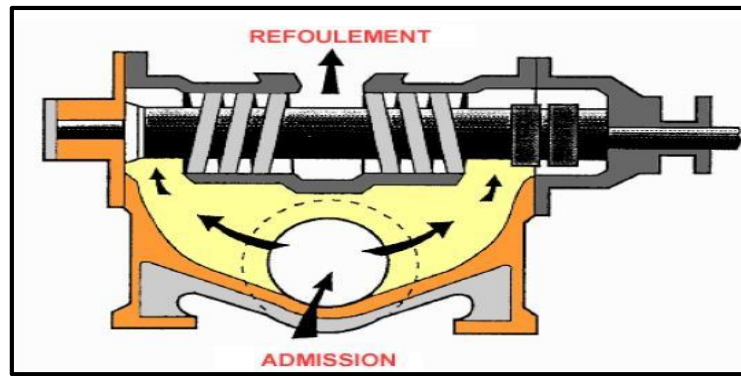


Figure I.8 : Pompes à vis [5]

1.3.1.1.2.3 Pompes à palettes :

Une pompe à palettes est une pompe rotative dont le rotor est muni de plusieurs lames (les palettes) qui coulissent radialement et assurent le transfert du fluide pompé. . [6]

Il existe trois types des pompes à palettes :

- Pompes à palettes libre.
- Pompes à palettes flexibles.
- Pompes à palettes guidées.

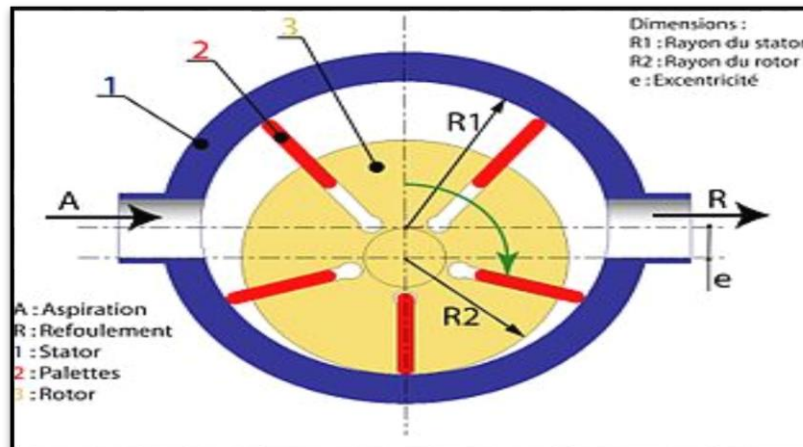


Figure I.9 : Pompes à palette [7]

- Pompes à palettes libre :

Les pompes à palettes libres sont des pompes volumétriques rotatives qui utilisent des palettes mobiles pour transférer un fluide d'une zone à basse pression vers une zone à haute pression. Ces pompes sont caractérisées par la présence de palettes qui coulissent radialement sous l'effet de la rotation du rotor, assurant ainsi le transfert du liquide.[8]

- Pompes à palettes flexibles :

Les pompes à palette flexible sont des équipements utilisés pour le transfert de liquides visqueux et denses, exempts de particules solides.

- Pompe à palette guidée :

Une pompe à palette guidée est un type de pompe qui utilise des palettes pour transférer des liquides.

1.3.1.1.2.4 Pompes à lobes :

Les pompes à lobes sont des pompes volumétriques rotatives qui fonctionnent en utilisant des lobes tournants en sens contraires, similaires à un engrenage. [9]

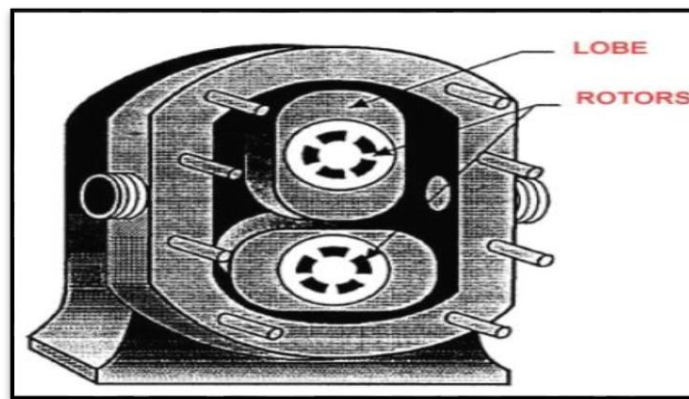


Figure I.10 : Pompes à lobes [5]

I.3.2 Pompes roto-dynamique (turbopompe) :

Dans la famille roto dynamiques, on classe les pompes :

Selon la trajectoire du fluide (trajectoire de l'écoulement) :

- Les pompes centrifuges (à écoulement radial).
- Les pompes hélico-centrifuges (à écoulement diagonal).
- Les pompes axiales ou à hélices (à écoulement axiales).

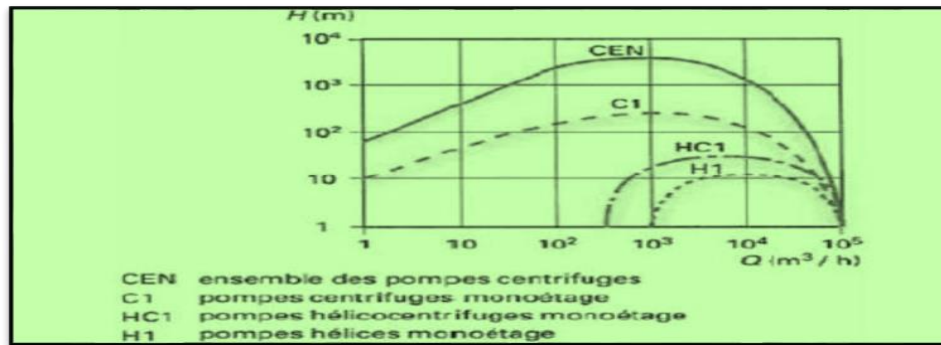


Figure I.11: Représentation des domaines respectifs des trois types de pompes roto-dynamiques. [10]

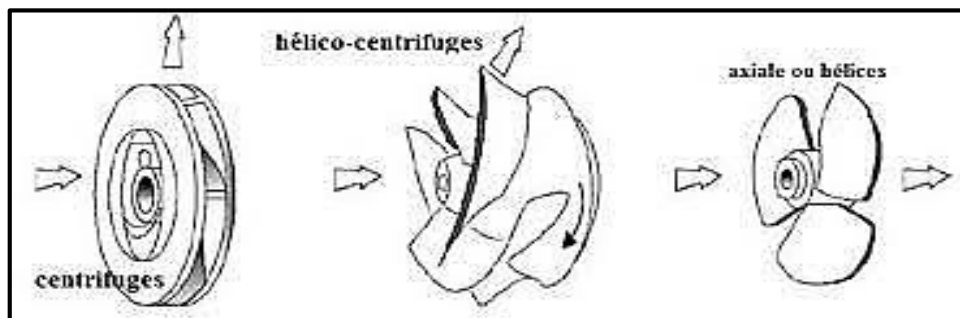


Figure I.12 : Types des pompes roto-dynamique. [11]

Selon le nombre d'étages :

- Monocellulaire : avec une seule roue (impulseur) sur l'arbre.
- Multicellulaire : avec plusieurs (impulseur) sur l'arbre disposé en série.

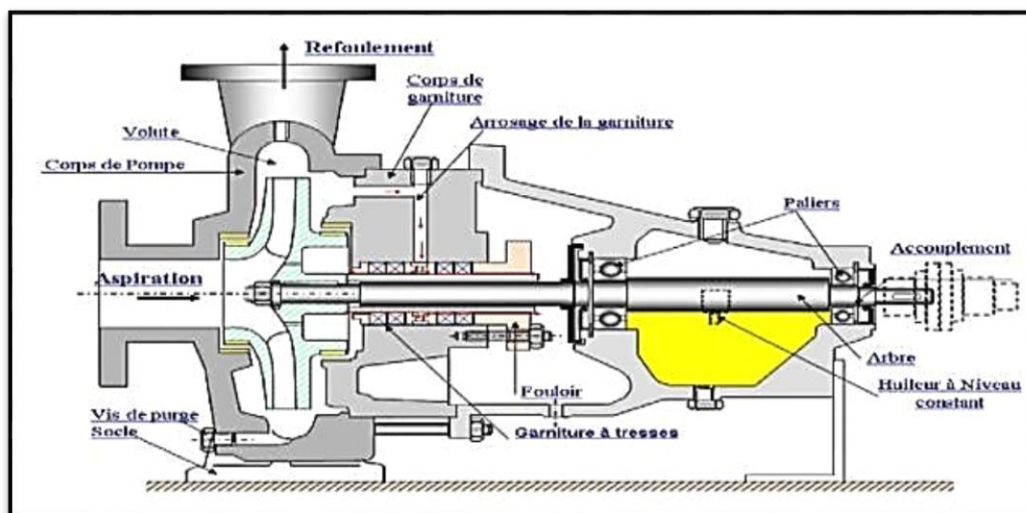


Figure I.13 : Pompe centrifuge monocellulaire en porte à faux. [12]

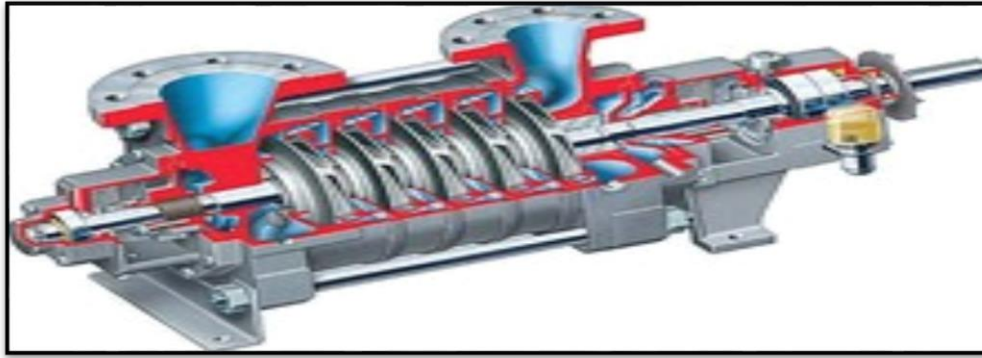


Figure I.14 : Pompe multicellulaire

Selon la disposition de l'axe de la pompe :

- Pompe verticale.
- Pompe horizontale.

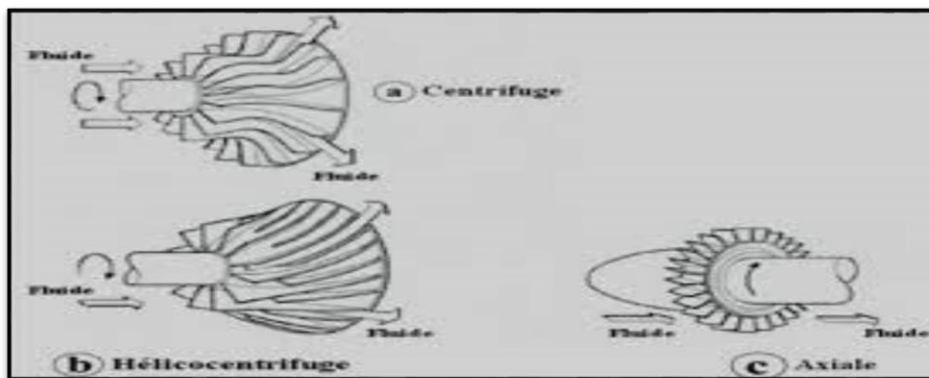


Figure I.15 : Roues mobiles de machines centrifuge, hélico centrifuge et axiale. [13]

- Les domaines d'utilisation de ces deux grandes catégories sont regroupés dans le graphe ci-dessous :

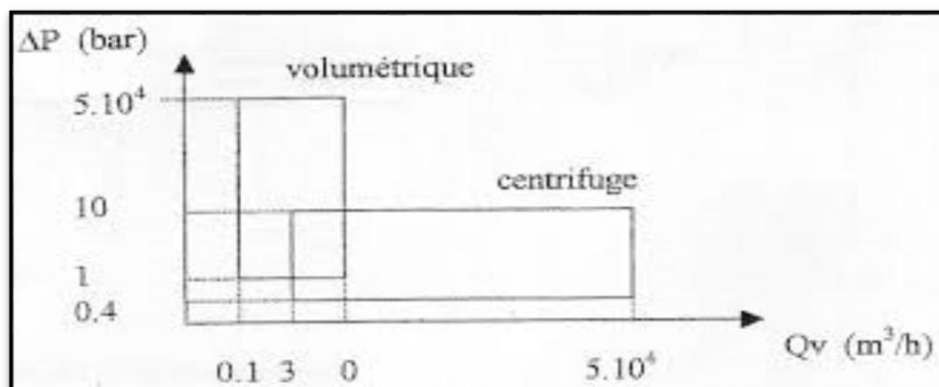


Figure I.16 : domaine d'utilisation des pompes. [14]

I.3.2.1 Pompes hélico-centrifuges :

La pompe hélico-centrifuge est, comme son nom l'indique, à la fois pompe axiale et pompe centrifuge. L'utilisation de cette pompe est très intéressante pour l'irrigation par pompage car elle offre un excellent compromis entre l'avantage de la faible hauteur de refoulement d'une pompe hélice et les rendements et les débits supérieurs à ceux d'une pompe centrifuge à volute. [15]

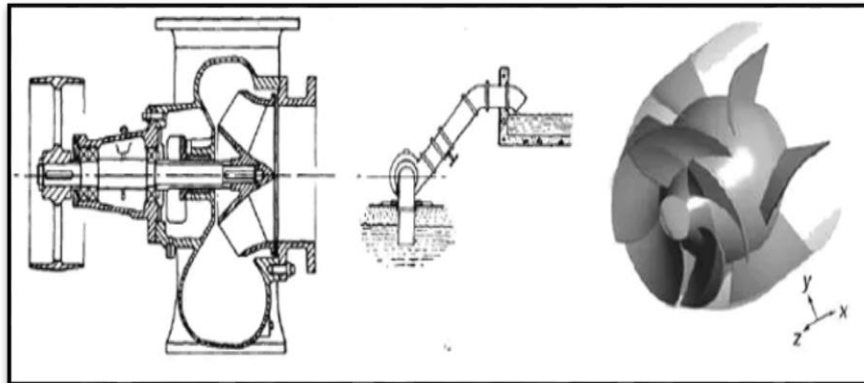


Figure I.17: Pompe hélico-centrifuges monté sur une surface. [15]

I.3.2.2 Pompes hélices :

Une pompe à hélice est un type de turbopompe rotative qui élève l'eau mécaniquement, par le pas d'une hélice à chacune de ses rotations.



Figure I.18 : Pompe hélices.

I.3.2.3 pompes centrifuges :

Une pompe centrifuge est un type de pompe utilisé pour déplacer les liquides en exploitant le principe de la force centrifuge. Son fonctionnement repose sur l'accélération du liquide à

l'aide de pales en rotation, lui conférant de l'énergie cinétique qui le propulse à travers les parois de la pompe avec une certaine pression.



Figure I.19 : Pompe centrifuge.

I.4 Les pompes centrifuges :

Les pompes centrifuges sont des équipements essentiels pour le transfert de fluides, utilisant la force centrifuge pour augmenter la pression et la vitesse du liquide pompé.

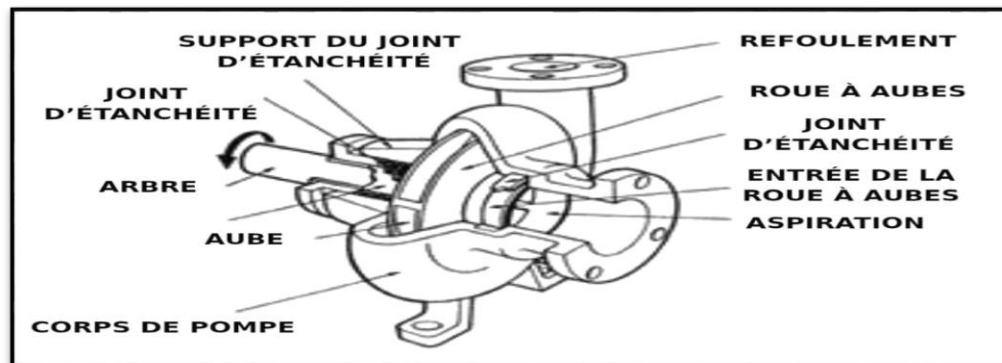


Figure I.20: Schéma d'une pompe centrifuge. [18]

I.4.1 composante d'une pompe centrifuge :

La pompe centrifuge est composée par deux éléments interne et externe :

I.4.1.1 Éléments Internes :

1. Impulseur (ou Roue) : Principal composant de la pompe, il génère une force centrifuge pour déplacer le liquide du centre vers l'extérieur. Les roues varient en forme et en matériaux selon les performances requises.

2. Boîtier (ou Bol) : Contient l'impulseur et fournit des surfaces hydrauliquement polies pour un fonctionnement efficace.

3. Arbre d'Entraînement : Relie l'impulseur au moteur électrique ou thermique, transmettant le couple nécessaire pendant le fonctionnement.

I.4.1.2 Éléments Externes :

1. Corps : Partie externe de la pompe, généralement en fonte pour l'eau potable ou en acier inoxydable pour les liquides corrosifs.

2. Orifice d'Aspiration : Canalise le fluide vers la roue pour le pompage.

3. Arbre d'Entraînement : Transmet le couple du moteur à la pompe.

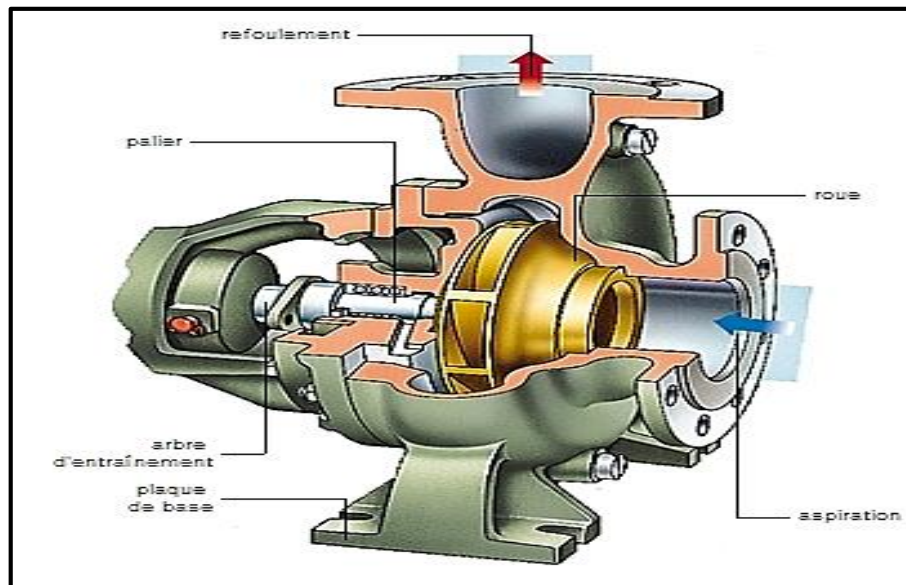


Figure I.21: Schéma d'une pompe centrifuge à roue

I.4.2 Principes de fonctionnement :

On peut décomposer le fonctionnement en deux étapes :

L'aspiration : Le liquide est aspiré au centre de la roue par une ouverture appelée distributeur dont le rôle est de conduire le fluide depuis la conduite d'aspiration jusqu'à la section d'entrée de la roue. 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.

Le refoulement : La roue transforme l'énergie mécanique appliquée à l'arbre de la machine en énergie cinétique. A la sortie de la roue, 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. La section offerte au liquide étant de plus en plus grande, son énergie cinétique se transforme en énergie de pression. [17]

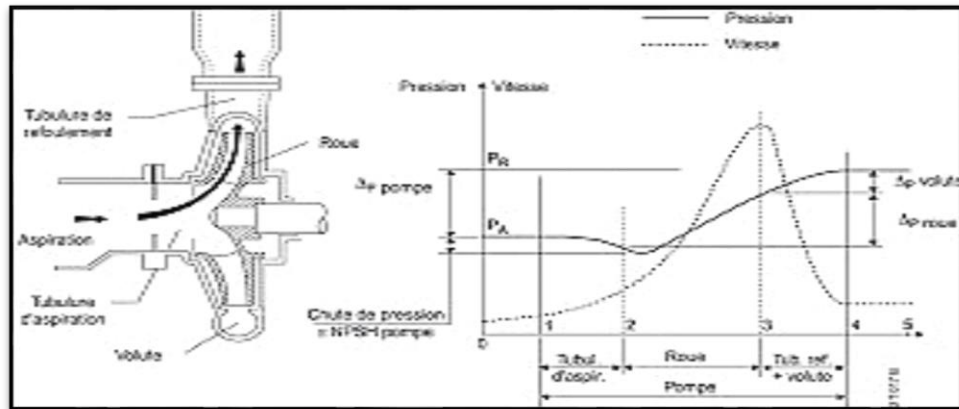


Figure I.22: Evolution de la vitesse et de la pression en fonction des différentes sections de la pompe [18]

I.4.3 Utilisation :

La pompe centrifuge est au centre de toute installation hydraulique. Utilisée dans le domaine environnemental, elle sert à des projets de grande envergure : approvisionnement en eau potable, irrigation et transfert d'eau, captage et dessalement d'eau maritime. Dans le secteur industriel, elle permet efficacement de résoudre les problèmes de captage, de refroidissements et de lavage. Dans le domaine de l'énergie elle permet d'assurer le bon fonctionnement du système anti-incendie.

I.4.4 Equipements d'installation de la pompe centrifuge :

I.4.4.1 Equipements d'aspiration de conduit (amont) :

L'eau à élever arrive à la station par une conduite que l'on relie directement au collecteur d'aspiration de l'usine d'où partent les aspirations des pompes, il n'existe aucune bache à la station. [19]

a) Collecteur d'aspiration :

Un collecteur d'aspiration est un dispositif utilisé dans les systèmes de pompage pour collecter l'eau d'aspiration.



Figure I.23 : Simple collecteur d'aspiration

b) Joints et coudes :

Si la conduite d'aspiration est en dépression, les joints pour supprimer toute possibilité d'entrée d'air et éventuellement d'entrée d'agent polluant.

D'autre part les coudes il permet de changements de direction du conduit.

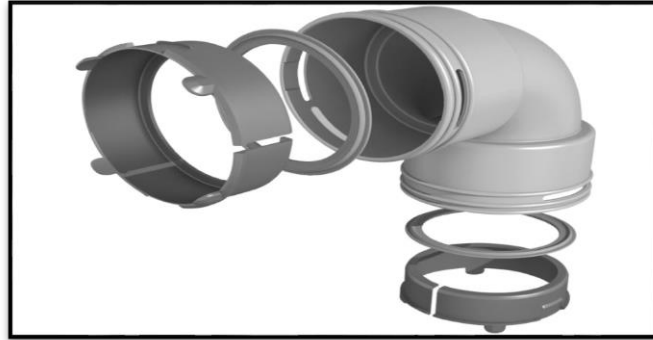


Figure I.24 : Joints et coudes

c) Vanne d'aspiration :

Une vanne montée à l'aspiration de la pompe permet d'isoler la pompe pour les travaux d'entretien ou démontage. Les vannes utilisées peuvent être soit des vannes à opercule avec presse-étoupe hydraulique, soit des vannes papillon.[19]



Figure I.25 : Vanne d'aspiration

d) Convergent d'aspiration :

Un convergent d'aspiration est une partie du système conçue pour accélérer le flux du fluide aspiré. Plus précisément, dans le contexte des pompes centrifuges, le convergent d'aspiration est généralement constitué par un cône convergent qui permet d'améliorer la disposition des flux liquides en améliorant le parallélisme et l'égalité des vitesses. Ce composant joue un rôle crucial dans le processus de pompage en favorisant une meilleure circulation du fluide à travers la pompe centrifuge. Il contribue à l'efficacité et à la performance globale du système en augmentant la vitesse du fluide aspiré. [19]

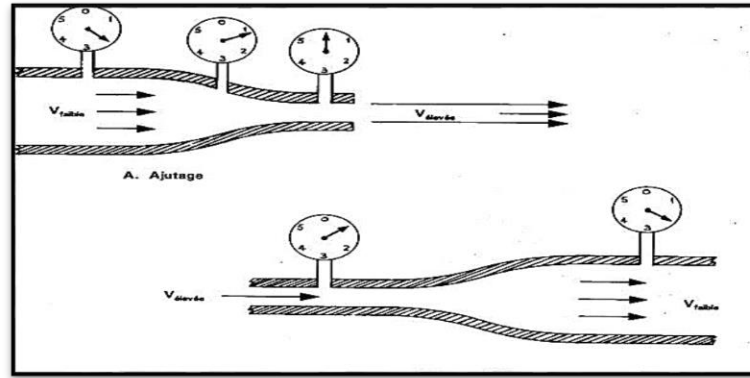


Figure I.26 : Exemple un Convergent

e) Débitmètres :

Il permet la mesure du débit de fluide.

f) Manomètres :

Il permet la mesure de la pression.

I.4.4.2 Les équipements de refoulement de conduit (aval) :

- a. Joint de raccordement
- b. Divergent
- c. Clapet de refoulement
- d. Vanne de refoulement
- e. Conduite ou collecteur de refoulement
- f. Débitmètres
- g. Manomètres

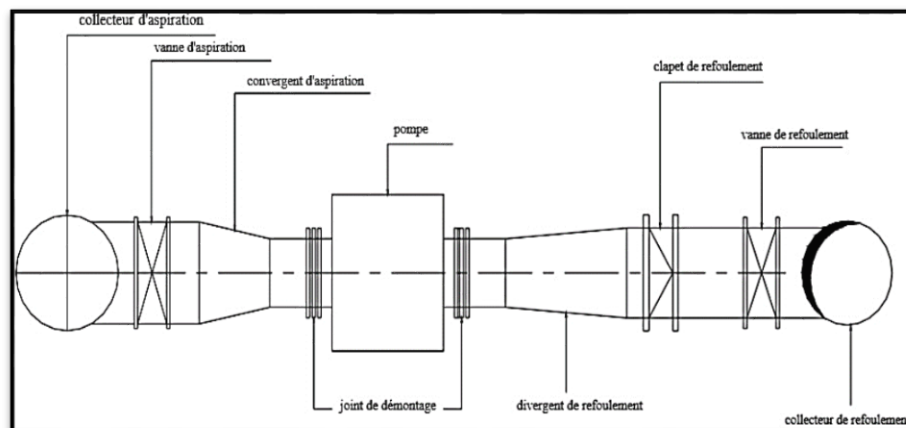


Figure I.27 : Equipement en aspiration et en refoulement d'une pompe [19]

I.5 Avantages et inconvénients de la pompe centrifuge : [20]

Avantages : Les pompes centrifuges sont les plus utilisées et elles couvrent environ 80% des pompes utilisées et présentent les avantages suivants :

- ✓ Machine de construction simple et nécessite peu d'entretien
- ✓ Prix d'achat modéré, cout de maintenance faible
- ✓ Bon rendement (70% à 80%)
- ✓ Adaptées à toute sorte de liquide
- ✓ Vitesse de rotation allant de 750 à 3000 trs/min, facilement entraîné par un moteur électrique.
- ✓ les pompes centrifuges admettent les suspensions chargées de solides

Inconvénients : Elles présentent aussi certains inconvénients :

- ✓ Impossible de pomper les liquides trop visqueux (les roues tournes sans entraînés le liquides)
- ✓ utilisation comme pompe doseuse : la nécessité de réaliser des dosages précis instantanés risque d'entraîner la pompe en dehors de ses caractéristiques optimales.
- ✓ Production d'une pression différentielle faible (0,5 à 10bars)
- ✓ Utilisation comme pompe doseuse : la nécessité de réaliser des dosages précis instantanés risque d'entraîner la pompe en dehors de ses caractéristiques optimales.

I.6 Théorie des pompes Centrifuges :

I.6.1 Critères généraux de définition des pompes :

Les critères les plus importants sont :

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

$$\omega = 2\pi \cdot n/60 \text{ (rad/S)} \quad (\text{I.1})$$

Le débit volumique Q_v : C'est le volume qu'une pompe peut ou doit fournir par unités de temps.

$$Q_v = u \cdot s \text{ (m}^3\text{/S)} \quad (\text{I.2})$$

avec:

u : vitesse d'écoulement (m/s)

s : section (m²)

La hauteur manométrique totale Hmt :

$$\text{Hmt} = H_{\text{théorique}} + \sum \text{perte de charge} \quad (\text{I.3})$$

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

$$P_u = \rho \cdot g \cdot Q \cdot \text{Hmt} \quad (\text{I.4})$$

I.6.2 Pertes de charge:

Les pertes de charge sont des chutes de pression dues à la résistance que rencontrent les fluides en écoulement : les actions de cisaillement occasionnent en effet des pertes énergétiques.

Les pertes de charge peuvent être :

- Linéaire ou régulières : elles correspondent alors à l'écoulement le long des conduites.

$$\Delta h_l = \lambda \frac{l}{D} \frac{U^2}{2g} \quad (\text{I.5})$$

avec:

Δh_l : perte de charge lineaire (mH₂O)

- Singulières : elles se manifestent sur les pièces spéciales qui modifient la direction ou la section de passage du fluide (raccord, T, vannes, soupapes, etc.)

$$\Delta h_s = \xi \frac{U^2}{2g} \quad (\text{I.6})$$

avec:

Δh_s : perte de charge singuliere (mH₂O)

I.6.3 Rendement de pompe centrifuge :

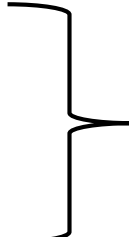
Le rendement de la pompe est le rapport entre la puissance hydraulique (reçue par le liquide) et la puissance mécanique fournie à la pompe. Ce rendement varie en fonction du débit. Il est représenté par une courbe fournie par le constructeur de la pompe. Le rendement permet de déterminer la puissance 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. [22]

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

$$\eta_g = \frac{P_U}{P_m} \quad (I.7)$$

$$\eta_g = \frac{\rho \times g \times H_{mt} \times Q_v}{P_m}$$


I.6.4 Hauteur manométrique totale de la pompe :

La hauteur manométrique totale d'une pompe est la somme de toutes ces contributions et représente l'énergie totale fournie par la pompe pour surmonter la résistance du système et déplacer le liquide du point d'aspiration au point de refoulement.

$$H_{mt} = H_{théorique} + \sum \text{perte charge} \quad (I.8)$$

I.6.5 Hauteur d'aspiration positive nette (Net Positive Suction Head):

La cavitation est un phénomène où le liquide dans une pompe se vaporise lorsqu'il est soumis à une pression inférieure à sa tension de vapeur à une température donnée. Cela se produit à l'entrée de la pompe, où des bulles apparaissent dans les zones de basse pression (comme l'entrée des aubes de roue des pompes centrifuges). Ces bulles sont ensuite transportées vers des zones de pression plus élevée où elles se condensent à nouveau. Cette condensation rapide provoque des implosions à haute fréquence, générant des surpressions locales très élevées (jusqu'à plusieurs centaines de bars). Le NPSH (Net Positive Suction Head) est une

caractéristique fournie par le fabricant, appelée "NPSH requis". Elle prend en compte la chute de pression que subit le fluide lorsqu'il s'accélère à l'entrée de la roue. Par ailleurs, le "NPSH disponible" est la différence entre la pression totale à l'entrée de la pompe au niveau de la bride (en absolu) et la pression de vapeur à la température du fluide. [23]

$$NPSH_{Disp} = \frac{1}{\rho g} (P_{bride\ abs} - P_v) \quad (I.9)$$

I.7 Point de fonctionnement :

Le point de fonctionnement d'une pompe centrifuge est la condition spécifique où la pompe fonctionne efficacement dans un système donné. Ce point est déterminé par l'intersection de la courbe de performance de la pompe et la courbe de réseau (charge).

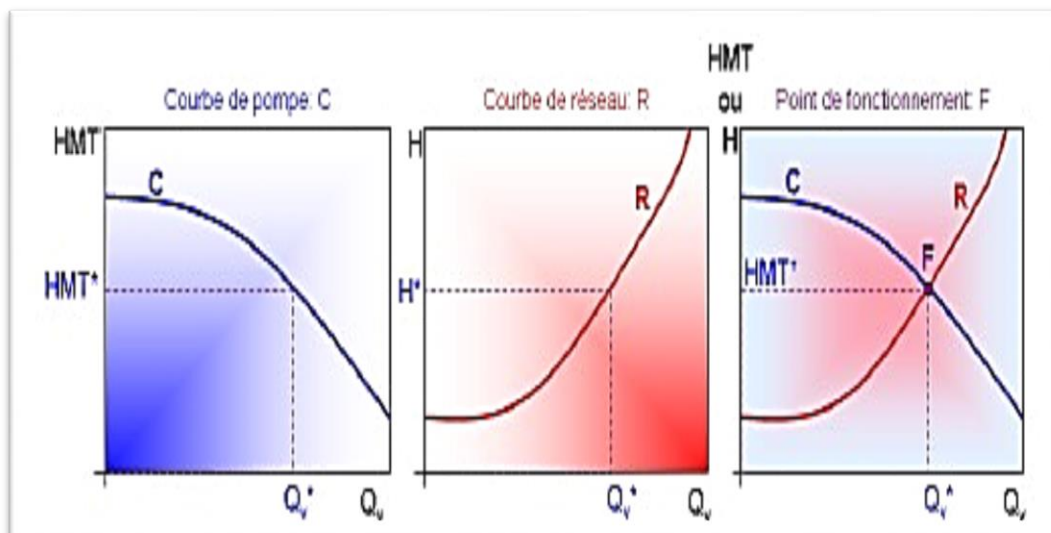


Figure I.28: Détermination de point de fonctionnement. [24]

✚ Courbe de performance de la pompe

La courbe de performance d'une pompe centrifuge est un graphique qui montre la relation entre le débit (Q) et la hauteur manométrique (H), ou pression, que la pompe peut fournir à différents débits. Cette courbe est fournie par le fabricant et varie selon la conception et les caractéristiques de la pompe. Les courbes de performance typiques incluent souvent plusieurs courbes secondaires pour l'efficacité, la puissance absorbée et parfois le NPSH (Net Positive Suction Head) requis.

✚ Courbe de réseau :

La courbe de la demande du système, ou courbe de charge, représente la relation entre le débit et la hauteur manométrique requise par le système dans lequel la pompe est installée.

Cette courbe dépend des caractéristiques des tuyauteries, des pertes de charge dues aux frottements, des élévations, et d'autres résistances du système.

- **Importance du point de fonctionnement**

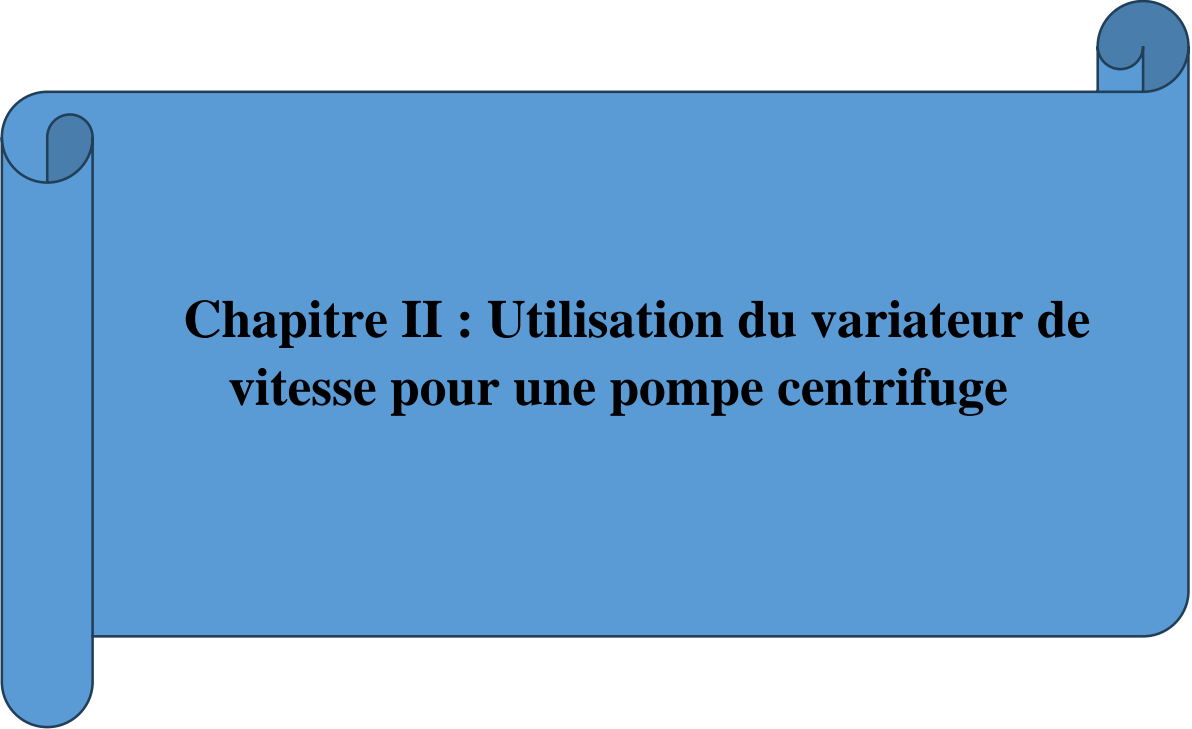
Efficacité : Le point de fonctionnement doit être proche du point de rendement optimal de la pompe pour minimiser la consommation d'énergie et maximiser l'efficacité.

Durabilité : Un fonctionnement éloigné du point de rendement optimal peut entraîner une usure prématurée de la pompe, des vibrations excessives, et des problèmes de cavitation.

Adaptation au système : Assurer que la pompe fonctionne à un point compatible avec les exigences du système pour éviter des problèmes tels que le manque de débit ou une pression excessive.

I.8 Conclusion :

Dans cette section, nous avons présenté succinctement les pompes, exposé leurs divers types, et description de la pompe centrifuge, élément central de notre recherche. Nous avons également examiné en détail le fonctionnement et les Critères généraux des pompes centrifuges



Chapitre II : Utilisation du variateur de vitesse pour une pompe centrifuge

II.1 Introduction :

Un variateur de vitesse pour pompes centrifuges permet de contrôler la vitesse du moteur électrique de manière flexible et efficace. Cela se traduit par une meilleure gestion des ressources énergétiques, une réduction des coûts d'exploitation et une prolongation de la durée de vie des équipements, ce qui en fait un élément essentiel dans les systèmes de pompage modernes.

II.2 Lien entre les Pompes et les Variateurs de Vitesse :

Les pompes et les variateurs de vitesse sont souvent utilisés ensemble dans diverses applications industrielles et commerciales pour améliorer l'efficacité énergétique et la performance des systèmes de pompage. Voici les principaux liens et avantages entre les pompes et les variateurs de vitesse :

1-Régulation du débit :

Les variateurs de vitesse ajustent la vitesse du moteur de la pompe pour correspondre aux besoins du système.

2-Efficacité énergétique :

En ajustant la vitesse de la pompe, on réduit la consommation d'énergie, évitant le fonctionnement à pleine capacité inutilement.

3-Réduction de l'usure :

Les démarrages et arrêts plus doux réduisent l'usure des composants de la pompe.

Contrôle et flexibilité accrus :

Les variateurs de vitesse offrent un contrôle précis, permettant une meilleure adaptation aux conditions changeantes.

4-Protection du système :

Les variateurs de vitesse protègent contre les surintensités, surtensions et surchauffes.

5-Réduction du bruit :

Les pompes à vitesse optimisée produisent moins de bruit.

II.3 Variateur de vitesse :

II.3.1 Définition:

Un variateur de vitesse, également appelé variateur de fréquence ou VFD (Variable Frequency Drive), est un dispositif électronique qui permet de contrôler et de réguler la vitesse

de rotation d'un moteur électrique en ajustant la fréquence et la tension de l'alimentation électrique. Cela permet une modulation précise de la vitesse du moteur en fonction des besoins spécifiques de l'application, améliorant ainsi l'efficacité énergétique, la performance et la durabilité des systèmes mécaniques.

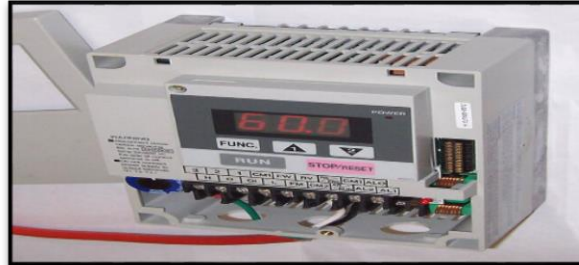


Figure II.1: Variateur de vitesse

II.3.2 Composition des Variateurs de Vitesse:

Les variateurs de vitesse sont composés de trois éléments principaux:

- Redresseur: Convertit le courant alternatif en un courant continu à l'aide d'un pont de diodes.
- Bus à Courant Continu: Régule le signal en tant que liaison CC ou filtre.
- Onduleur à IGBT : convertir le courant continu en courant alternatif à une fréquence qui peut varier. [25]

II.3.3 fonctionnement du variateur de vitesse :

La fréquence de la tension d'alimentation influence directement la vitesse du champ magnétique et par conséquent la vitesse de rotation d'un moteur asynchrone. C'est sur ce paramètre que le variateur de vitesse intervient. Le principe général est de fournir un courant à différentes fréquences tout en maintenant une tension stable et adaptée aux besoins de fonctionnement du moteur.

Un variateur de vitesse est constitué de quatre principaux composants : le redresseur, le circuit intermédiaire, l'onduleur et le circuit de commande. [25]

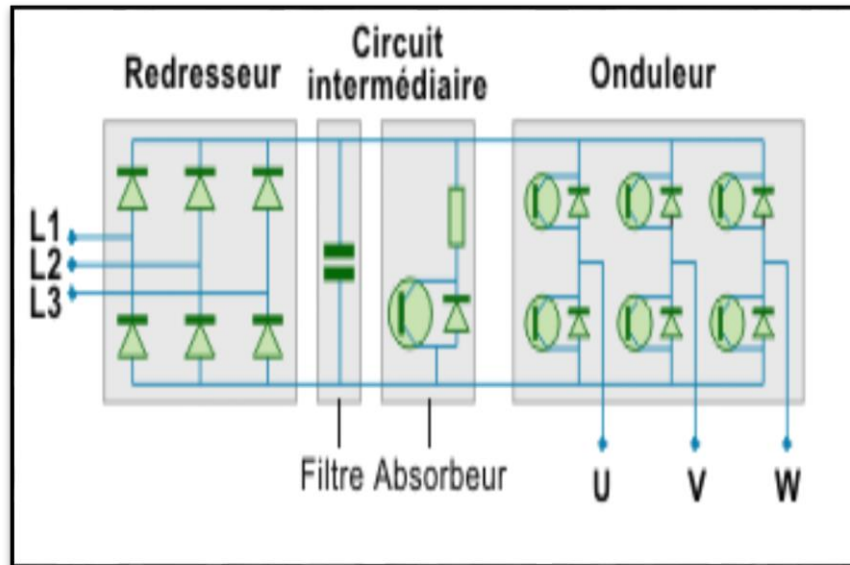


Figure II.2: Schéma fonctionnement du variateur de vitesse

La figure (II.2) montre un variateur de vitesse pour moteur électrique, comprenant trois sections principales : le redresseur, le circuit intermédiaire et l'onduleur. Voici une explication de chaque section :

Redresseur :

- L1, L2, L3 : Les phases de l'alimentation secteur (triphase).
- Diodes : Les diodes sont disposées en pont redresseur pour convertir l'alimentation alternative (AC) en courant continu (DC). Chaque phase est redressée, ce qui permet d'obtenir une tension DC à la sortie du redresseur.

Circuit intermédiaire :

Condensateur : Ce composant est utilisé pour lisser la tension DC obtenue à la sortie du redresseur. Il stocke l'énergie et fournit une tension stable pour l'onduleur.

Filtre Absorbeur : Un filtre pour réduire les transitoires et les pics de tension, protégeant ainsi les composants de l'onduleur et assurant une alimentation plus stable.

Onduleur

- Transistors de puissance (ou IGBT) : Les transistors (ou autres types de commutateurs électroniques comme les IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistors) dans l'onduleur commutent la tension DC pour produire une tension AC de fréquence et d'amplitude variables.

- Sorties U, V, W : Les phases de sortie du variateur qui alimentent le moteur triphasé. L'onduleur génère les trois phases nécessaires pour le moteur en modulant la tension DC en tension AC de la fréquence désirée.[25]

II.3.4 Pourquoi utiliser un variateur de vitesse ?

- Réduire la consommation électrique d'une pompe, ajustez sa vitesse avec un variateur de vitesse et assurez-vous qu'elle est correctement dimensionnée et bien entretenue.
- Substituer une vanne de régulation énergivore.
- Générer une variété infinie de courbes « Débit/Pression » à l'aide d'une seule pompe.
- Identifier l'absence de débit pour assurer la protection des installations.

II.3.5 Critères de choix d'un variateur :

Critères de choix d'un variateur de fréquence à installer pour les moteurs asynchrones sont nombreux

1 Facteurs technique :

- La tension du réseau d'alimentation.
- La puissance et la vitesse nominale
- Type de rotor de moteur (bobiné ou cage).
- Type de variation de la vitesse (régime permanent ou intermittent)
- Les contraintes d'installation (place disponible, degrés de protection).
- Type de machine entraînée (inertie, caractéristique de couple résistant selon la vitesse).

2 Facteurs économique :

Un critère essentiel est bien sûr le coût total d'investissement de l'entraînement comprenant le coût du variateur, du moteur et de leur installation. Le coût d'exploitation de l'entraînement (maintenance, coût d'indisponibilité) est un critère économique supplémentaire de choix.

II.3.6 Méthodes de réglages de débit d'une pompe centrifuge :

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

❖ Régulation de débit par laminage :

La courbe caractéristique se redresse en raison de l'augmentation des pertes de charges dans la vanne de régulation. En utilisant une pompe à vitesse fixe, le point de fonctionnement se déplace vers le débit nul en suivant la courbe caractéristique. Ainsi, la pompe produit une hauteur manométrique supérieure à celle requise pour le bon fonctionnement de l'installation. La vanne de laminage absorbe la hauteur supplémentaire ainsi créée.[26]

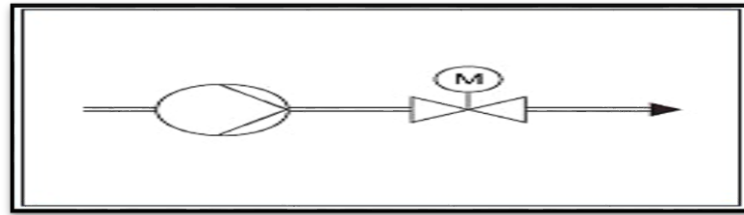


Figure II.3 : Schéma avec vanne de laminage.[26]

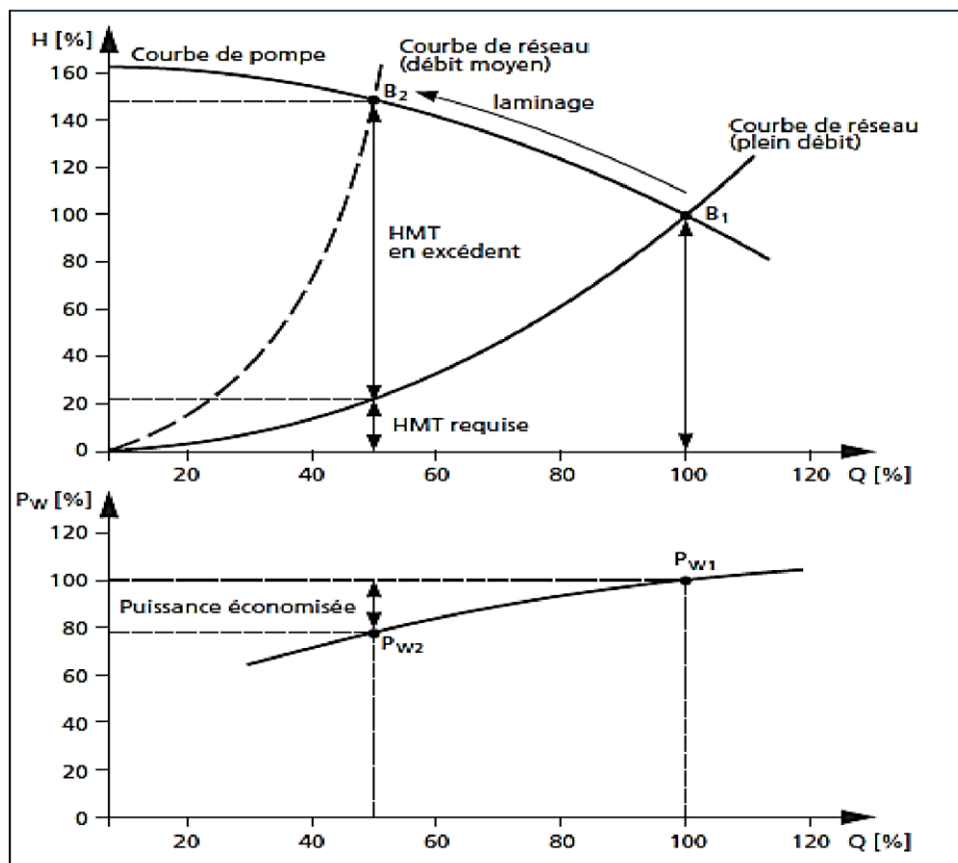


Figure II.4 : Courbes caractéristiques pompes et puissance absorbée.[26]

Avantage :

- Méthode de régulation facile

- Idéal pour les installations qui sont généralement utilisées à plein débit
- Idéal pour les applications à durée de fonctionnement faible
- Idéal pour les pompes à courbes plates.

Inconvénients :

- Mal conçu pour les pompes à courbe pentue (pression excessive)
- Performance médiocre avec des débits faibles.
- Faibles économies d'énergie en charge partielle
- Défaut de régulation lorsque l'excès de HMT est élevé
- Installation d'une vanne de laminage
- Des bruits hydrauliques peuvent survenir lorsque la vanne est proche de la fermeture (par exemple, au niveau des robinets thermostatiques).

▪

❖ Régulation du débit avec un by-pass :

La pompe est placée parallèlement à la tuyauterie de by-pass. La pompe fournit un débit qui est divisé entre le débit qui se dirige vers l'installation et le débit qui traverse le by-pass. En utilisant la vanne de régulation pour modifier le débit du by-pass ou la courbe caractéristique de la tuyauterie du by-pass, il est possible de modifier le débit transmis dans l'installation. De son côté, la pompe demeure constamment proche du même point de fonctionnement, c'est-à-dire le point de fonctionnement de l'installation à un débit nominal.

[26]

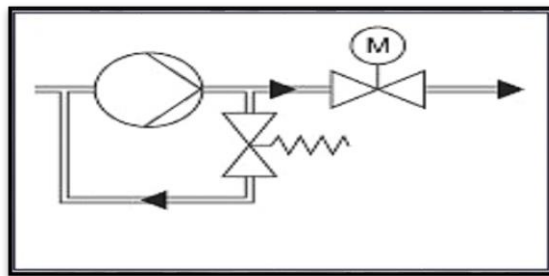


Figure II.5 : Schéma d'une régulation par by-pass.[26]

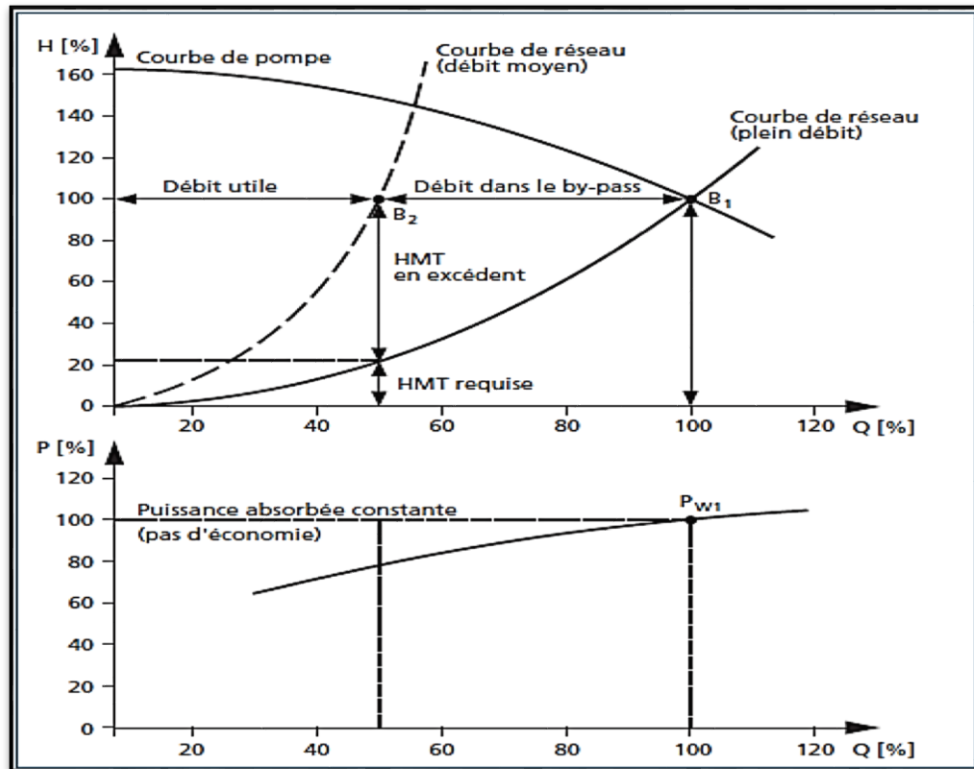


Figure II.6: Courbes caractéristiques pompe et puissance absorbée. [26]

Avantage :

- Contrairement au laminage, la pression demeure inchangée peu importe le débit.
- Idéal pour les hauteurs manométriques faibles et les débits élevés.
- il est préférable d'utiliser des débits élevés.

Inconvénients :

- Frais d'installation accrus (installation de la tuyauterie du by-pass).
- Une pression excessive à débit partiel.
- Un bilan énergétique négatif,

❖ Régulation du débit par variation de vitesse

À la différence des régulations de débits mentionnées précédemment, la modification de la vitesse permet d'ajuster constamment la puissance de la pompe en fonction des exigences de l'installation.

Si le débit augmente de manière linéaire, cela entraîne une augmentation des pertes de charges de l'installation dans le carré du débit. Il en est de même des pompes centrifuges : lorsque le débit et la vitesse augmentent de manière linéaire, la hauteur manométrique augmente avec le

Carré de la vitesse qui augmente.

Grâce à ces règles hydrauliques, une variation de vitesse minimale permet de couvrir une large plage de fonctionnement. [26]

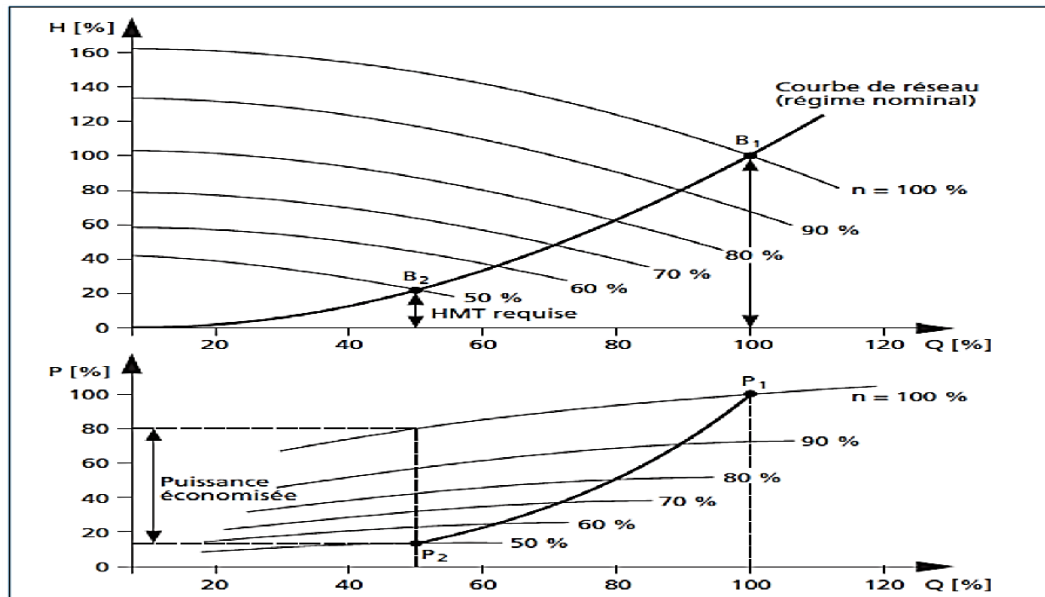


Figure II.7: Courbe caractéristique pompe et puissance absorbée.[26]

Ce diagramme montre la relation entre le débit (Q), la hauteur manométrique totale (H), et la puissance (P) pour une pompe, illustrant l'impact de la régulation de la vitesse de la pompe sur ces paramètres.

✚ Partie supérieure du diagramme (Hauteur manométrique totale H en fonction du débit Q) :

- Axe vertical (H [%]) : Hauteur manométrique totale en pourcentage de la valeur nominale.
- Axe horizontal (Q [%]) : Débit en pourcentage du débit nominal.
- Courbes $n = 100\%$, 90% , 80% , 70% , 60% , 50% : Ces courbes représentent les performances de la pompe à différentes vitesses (n) exprimées en pourcentage de la vitesse nominale.
- Courbe de réseau (régime nominal) : Ligne noire épaisse montrant la relation entre la hauteur manométrique et le débit pour le système hydraulique en régime nominal.

Points B1 et B2 :

- B1 : Point de fonctionnement de la pompe à 100% de sa vitesse nominale.
- B2 : Point de fonctionnement de la pompe à 50% de sa vitesse nominale.

Lorsque la vitesse de la pompe est réduite, la courbe de la pompe se déplace vers le bas et vers la gauche, ce qui diminue la hauteur manométrique et le débit pour une même courbe de réseau.

✚ Partie inférieure du diagramme (Puissance P en fonction du débit Q) :

- Axe vertical (P [%]) : Puissance en pourcentage de la puissance nominale.
 - Axe horizontal (Q [%]) : Débit en pourcentage du débit nominal.
 - Courbes n = 100%, 90%, 80%, 70%, 60%, 50% : Ces courbes montrent la consommation de puissance de la pompe à différentes vitesses.
 - Points P1 et P2 :
- P1 : Puissance consommée par la pompe à 100% de sa vitesse nominale et à débit nominal.
- P2 : Puissance consommée par la pompe à 50% de sa vitesse nominale.
- La réduction de la vitesse de la pompe (diminution de la fréquence du variateur de vitesse) entraîne une réduction significative de la puissance consommée, comme illustré par la distance verticale entre P1 et P2.

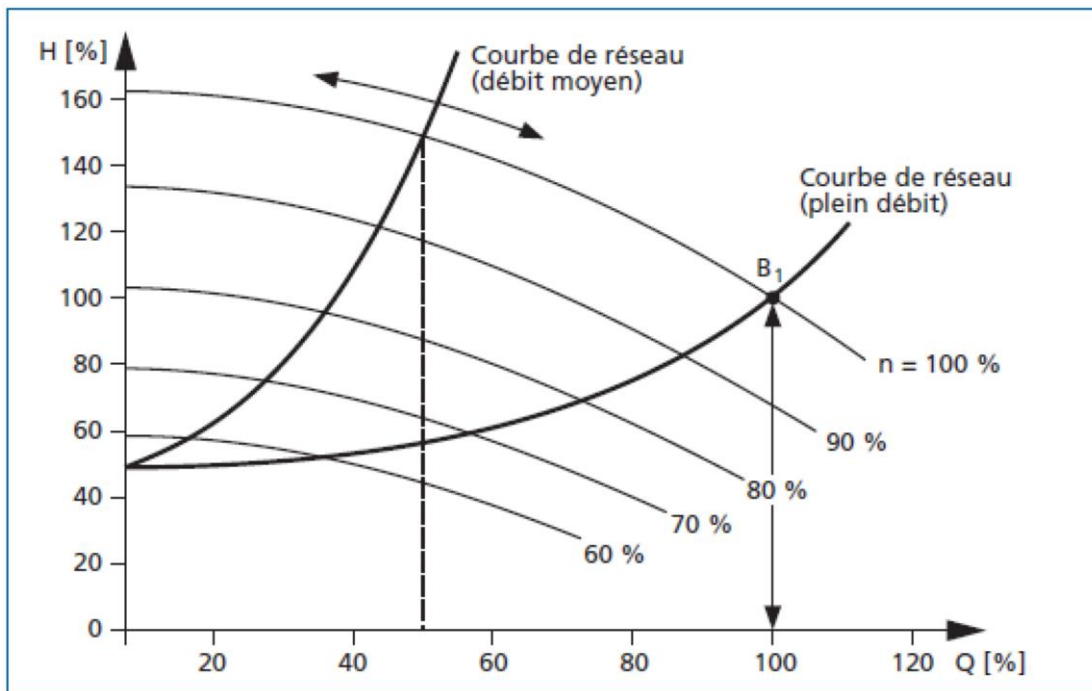


Figure II.8: Fonctionnement d'une pompe régulée avec différentes courbes de réseau. [26]

Avantage :

- Démarrage graduel de la pompe connectée au variateur
- Réduction de l'utilisation des composants mécaniques

- La diminution des réactions hydrauliques (comme les pics de pression...) permet d'économiser de l'énergie et de limiter les courants de démarrage, ce qui permet de réduire la charge globale du réseau électrique.
- Réduction des dépenses liées au cycle de vie.

Inconvénients:

- Frais de régulation plus élevés.

II.3.7 Effets de la Variation de Vitesse sur les pompes centrifuges :

La performance d'une pompe centrifuge est représentée par un ensemble de courbes Débit/Hauteur Manométrique en fonction de la fréquence, qui correspond à la vitesse de rotation du moteur. Chaque changement de vitesse est associé à une nouvelle courbe de performance spécifique. Pour chaque pompe, il existe une courbe caractéristique qui lui est propre, généralement tracée à 50 et 60 Hz.[11]

Lorsque la vitesse d'une pompe centrifuge varie, les caractéristiques de la charge varient également de manière prévisible, conformément aux lois de similitude ou lois d'affinité des pompes centrifuges. Ces lois indiquent que, pour des conditions similaires au niveau dynamique ou courant, certains paramètres non-dimensionnels restent constants. Elles indiquent que lorsque la vitesse varie, la variation du débit de la pompe est directement proportionnelle à la nouvelle vitesse, la Hauteur Manométrique est proportionnelle au carré de la variation de vitesse et la puissance en H.P. est proportionnelle au cube de la variation de vitesse. [11]

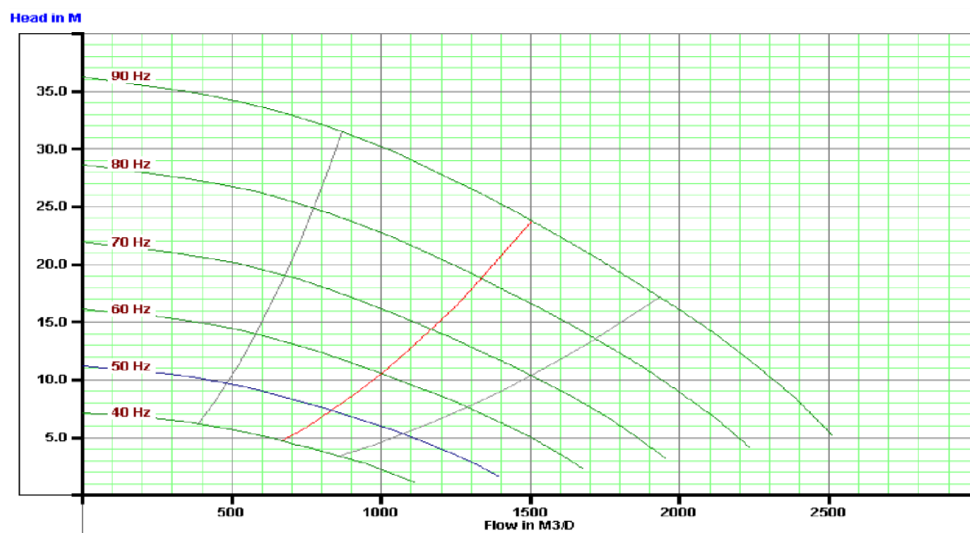


Figure II.9 : Courbe de performances de la pompe, qui montre la relation entre la hauteur manométrique (en mètres) et le débit (en mètres cubes par jour) pour différentes fréquences.

[11]

II.3.8 Effets de la Variation de Vitesse sur les moteurs :

Chaque moteur fonctionnant à vitesse fixe dispose d'un couple maximum disponible sur son arbre, à condition que la tension à ses bornes soit appropriée. Ce même couple peut être obtenu à différentes vitesses en ajustant la tension proportionnellement à la fréquence. De cette façon, le courant magnétisant et la densité de flux magnétique restent constants et le couple disponible reste pratiquement constant au glissement nominal. De ce fait, la puissance d'un moteur est directement proportionnelle à sa vitesse, puisque la puissance s'obtient en multipliant le couple nominal par la vitesse. Il est important de noter que surévaluer un moteur de cette manière augmente la puissance disponible du moteur. [27]

II.4 Importance de la vitesse variable dans le fonctionnement des pompes centrifuges :

Elle réside dans plusieurs aspects clés qui influent sur leur efficacité et leur performance globale :

- ✓ Économies d'énergie significatives : La vitesse variable permet d'ajuster la vitesse de la pompe en fonction des besoins réels, ce qui se traduit par des économies d'énergie considérables. Par exemple, en réduisant la vitesse de la pompe, on peut atteindre jusqu'à 68% d'économie d'énergie.
- ✓ Régulation du débit : La vitesse variable permet une régulation précise du débit de la pompe, ce qui contribue à optimiser son fonctionnement et à réduire les contraintes sur le matériel. Cela se fait de manière plus efficace que la régulation via une vanne.
- ✓ Amélioration du Mean Time Between Failure (MTBF) : En utilisant la vitesse variable, on observe en moyenne une amélioration de 45% du MTBF, ce qui signifie une plus grande fiabilité et durabilité de la pompe.
- ✓ Conformité aux normes de sécurité : Les pompes centrifuges équipées de variateurs de vitesse sont conçues pour respecter les normes de sécurité, notamment en prévenant la surchauffe du moteur et en réduisant les risques d'explosion.
- ✓ Usure réduite : en ajustant la vitesse du moteur pour répondre aux besoins réels de l'application, les entraînements à vitesse variable réduisent les contraintes mécaniques et prolongent la durée de vie de l'équipement.
- ✓ Efficacité améliorée : les entraînements à vitesse variable contribuent à augmenter l'efficacité des processus de production en réduisant la consommation d'énergie et en prolongeant la durée de vie des équipements. [27]

II.5 Avantages de l'utilisation d'un variateur de vitesse pour réduire la consommation d'énergie :

- Adaptation de la puissance du moteur à la charge réelle :

Le variateur de vitesse permet d'ajuster la puissance du moteur à la charge, évitant ainsi une surconsommation d'énergie, notamment pour les applications centrifuges telles que les pompes, ventilateurs et compresseurs.

Réduction des pics d'intensité et des séquences de marche/arrêt :

En contrôlant la vitesse du moteur, le variateur de vitesse permet de réduire les pics d'intensité dans la consommation électrique et d'éliminer les séquences de marche/arrêt, contribuant ainsi à une réduction significative de la consommation d'énergie.

- Amélioration de la performance énergétique :

En faisant varier la puissance du compresseur, du ventilateur de condenseur ou de la pompe, le variateur de vitesse améliore la performance énergétique de l'installation, permettant une adaptation précise de la puissance électrique absorbée à la puissance nécessaire.

- Réduction des coûts de maintenance :

En limitant les appels de courant importants et en assurant un démarrage progressif des moteurs, les variateurs de vitesse contribuent à réduire les coûts de maintenance et à augmenter la longévité des équipements.

Pour entretenir un variateur de vitesse et ainsi contribuer à réduire la consommation d'énergie, voici quelques conseils :

- Maintenance régulière:

Assurer un entretien régulier du variateur de vitesse pour garantir son bon fonctionnement et éviter les surconsommations d'énergie anormales dues à un équipement défectueux. [27]

II.6 Conclusion :

Le variateur de vitesse est un outil essentiel pour améliorer l'efficacité énergétique et la fiabilité d'une pompe centrifuge. En ajustant la vitesse du moteur, il permet d'adapter la

puissance du moteur à la charge, réduisant ainsi la consommation d'énergie et améliorant la régulation du débit de la pompe.

A blue scroll graphic with a dark blue outline and rounded corners. The scroll is unrolled in the center, with the top and bottom edges curling upwards and downwards respectively. The text is centered on the unrolled portion.

**Chapitre III : Calcul et vérification de la
pompe KSB**

III-1 Introduction :

Ce chapitre sera divisé en deux parties, la première partie se concentre sur la description des groupes électropompes et sur une analyse globale de la pompe CPK S1 100-315(P161A). Cela, ça va nous permettre de découvrir les divers organes qui composent la pompe.

Dans la partie suivante, nous allons exposer les diverses opérations de calcul de la pompe, telles que la vitesse moyenne d'écoulement, et la hauteur manométrique, afin de calculer les paramètres de la roue de la pompe centrifuge.

III.1.1 Description du groupe électropompe :

Les groupes électropompes sont constitués de deux parties :

- **Le moteur** : permet un mouvement de rotation pour faire tourner la pompe.
- **La pompe** : c'est la partie entraînée par le moteur pour aspirer l'eau et faire le refoulement.

Les deux sont liés par un accouplement rigide à manchon élastique qui diminue les frottements dus au choc de démarrage.

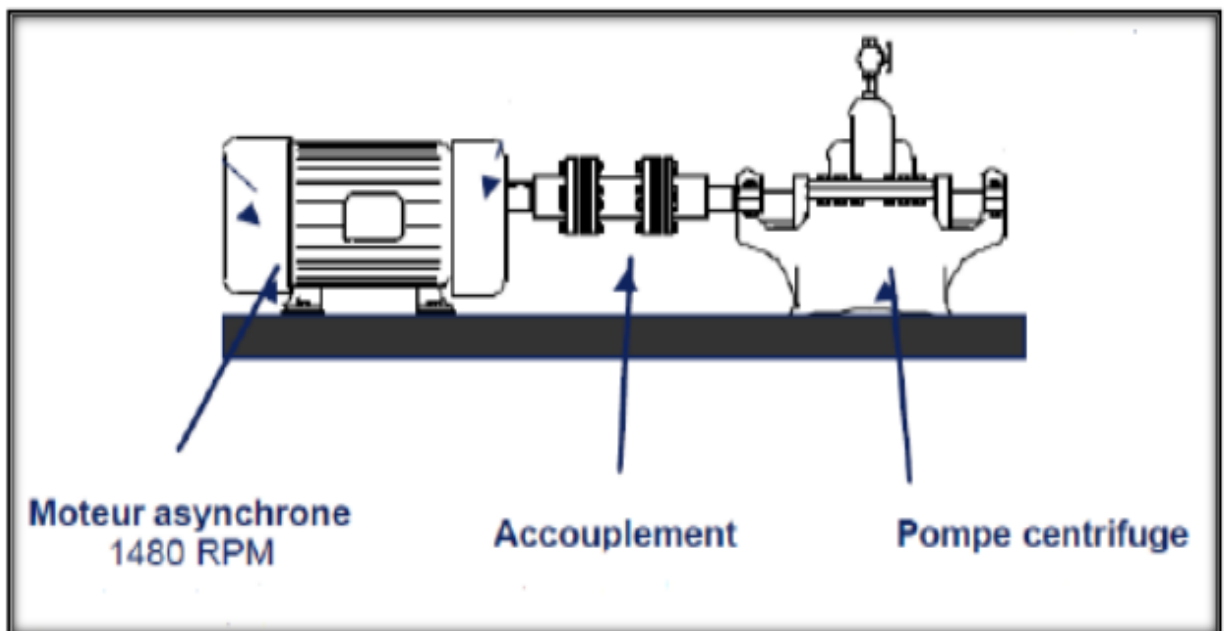


Figure III.1: Schématisation d'un groupe électropompe

III. 1.1.1 Moteurs :

La plupart des moteurs au complexe de production sont des moteurs asynchrones triphasés.

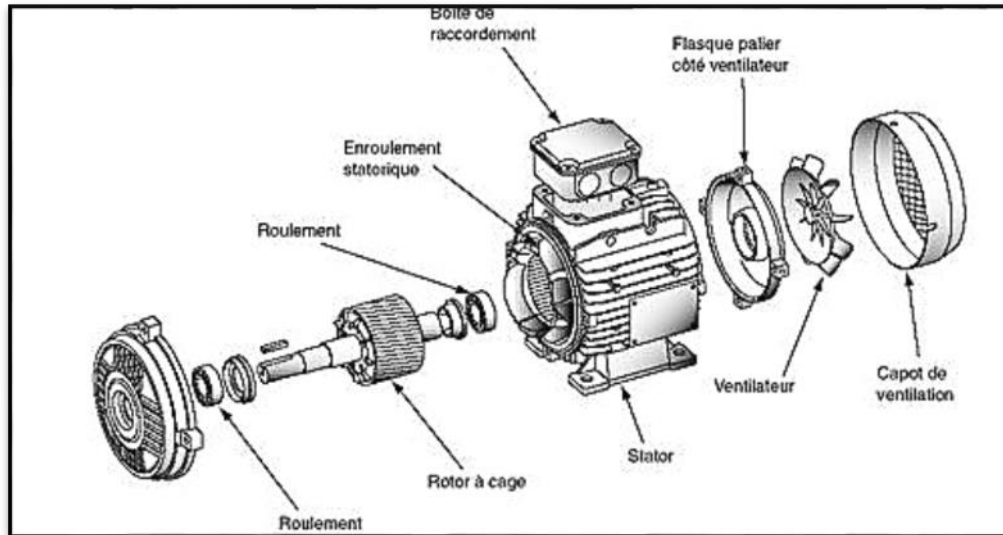


Figure III.2: Illustration d'un moteur asynchrone triphasé en coupe. [28]

III.1.1.2 Descriptif du moteur d'un point de vue mécanique :

- **Le stator** : partie fixe de la machine.
- **Le rotor** : partie mobile de la machine, qui tourne à l'intérieur du stator et est reliée à un arbre de transmission.
- **L'entrefer** : espace situé entre le rotor et le stator.

Les moteurs asynchrones triphasés à cage d'écureuil présentent de nombreux avantages : ils sont simples, robustes et faciles à entretenir selon le type à cage d'écureuil ou à rotor bobiné. Ces caractéristiques expliquent leur grande popularité dans le milieu industriel.

III.1.1.2 Principe de fonctionnement :

Le moteur asynchrone à cage d'écureuil fonctionne selon le principe de l'induction. Voici les étapes clés de son fonctionnement : [28]

Génération du champ magnétique : Un courant triphasé circule dans les enroulements du stator, générant un champ magnétique tournant.

Induction du courant dans le rotor : Ce champ magnétique tournant induit un courant dans les barres conductrices du rotor, qui sont court-circuitées aux extrémités par des anneaux du même matériau. Les barres sont généralement en aluminium ou cuivre.

Génération du couple : Le courant induit dans le rotor génère un couple qui fait tourner le rotor dans le sens contraire du champ magnétique. Ce couple est responsable de la rotation du moteur.

Couplage étoile ou triangle : Les enroulements du stator peuvent être connectés en étoile ou en triangle, ce qui permet de choisir la tension d'alimentation optimale pour le moteur. Le couplage étoile est utilisé pour les tensions plus basses, tandis que le couplage triangle est utilisé pour les tensions plus élevées.

Rendement et fiabilité : Les moteurs asynchrones à cage d'écureuil sont connus pour leur faible coût de fabrication, leur résistance aux températures élevées et leur fiabilité. Ils sont souvent utilisés dans des applications industrielles et électroménagères où une grande robustesse et une longue durée de vie sont nécessaires.

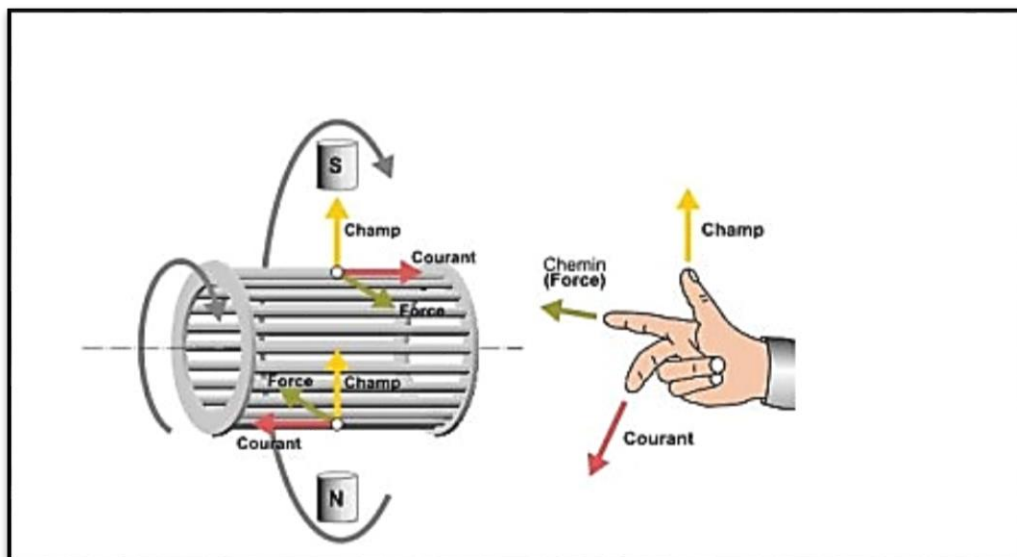


Figure III.3 : Schéma représentant le principe de fonctionnement d'un moteur asynchrone à cage. [29]

III.1.1.4 Caractéristiques techniques de Moteur d'entraînement :**Tableau III.1 : Plaque signalétique du moteur asynchrone**

Moteur de marque	KSB
Indice de protection	IP55
Nombre de phase d'alimentation	3 ~
Classe de rendement	IE2
Fréquence du réseau d'alimentation	50 HZ
Puissance moteur (utile)	18.5KW
Vitesse rotation	1465tr/min
Facteur de puissance	0.84
Courant	35A
Tension d'alimentation en volte	400/690V
Température ambiante	-20°C ≤ Tamb ≤ 40°C

III.1.1.5 Couplage des enroulements :

Le couplage des enroulements statoriques d'un moteur asynchrone triphasé peut être réalisé de deux manières différentes, en fonction de la tension du réseau électrique disponible et de la tension que les enroulements peuvent supporter. Voici les étapes à suivre pour déterminer le couplage approprié : [30]

1- Identifier les deux tensions indiquées sur la plaque signalétique du moteur :

Par exemple 230/400 V. La plus petite tension correspond à la tension que peut supporter un enroulement du stator.

2- Comparer ces tensions avec la tension du réseau triphasé disponible :

- Si la tension du réseau entre phases correspond à la plus grande tension indiquée sur la plaque signalétique, le couplage à réaliser est le couplage étoile (Y). Le couplage s'effectue au moyen de 2 barrettes en cuivre.
- Si la tension du réseau entre phases correspond à la plus petite tension indiquée sur la plaque signalétique, le couplage à réaliser est le couplage triangle (Δ). Le couplage s'effectue au moyen de 3 barrettes en cuivre.

3- Dans le cas du couplage étoile : chaque enroulement est alimenté sous la tension la plus faible indiquée sur la plaque signalétique.

4- Dans le cas du couplage triangle : chaque enroulement doit pouvoir supporter la tension du réseau entre phases

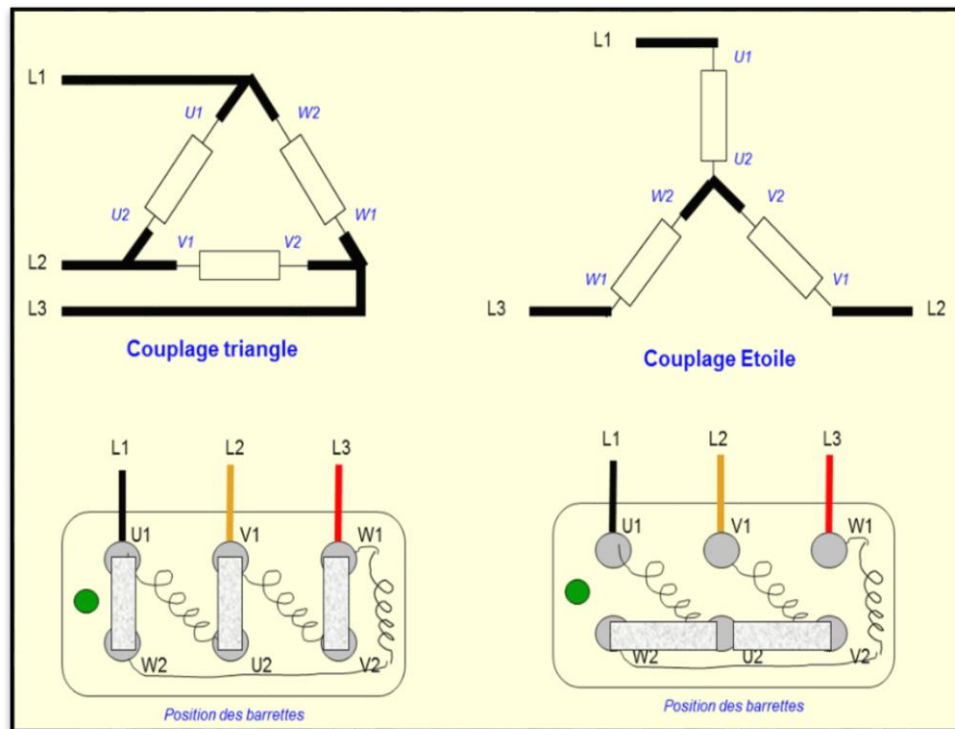


Figure III.4: Couplage de l'enroulement [30]

➤ **Accouplement :**

Les accouplements sont des dispositifs qui établissent une connexion entre l'arbre d'un moteur et l'arbre d'une machine, permettant ainsi de transférer la puissance du moteur vers la machine en question. Dans ce rôle, ils offrent deux avantages principaux :

1. Ils permettent de séparer les deux arbres lorsque cela est nécessaire.
2. Ils peuvent tolérer de petites déformations d'alignement causées par le déplacement des équipements en service.

En somme, les accouplements sont des éléments clés pour assurer une transmission efficace et flexible de la puissance entre les arbres d'un moteur et d'une machine, tout en offrant la possibilité de les dissocier et en tolérant les petites déformations d'alignement.



Figure III.5 : Vue de l'ensemble de l'accouplement

III-2 Description de la pompe CPK S1 100-315 (P161A) :

La pompe (P161A) est une pompe centrifuge à volute horizontale, à joint perpendiculaire à l'axe en construction process, avec roue radiale, mono flux mono étagé.

Cette pompe est entraînée par un moteur électrique il tourne à une vitesse de rotation 1460 tr/min), fournissant un débit 110 (m^3/h), elle assure le transport de sirop (l'eau sucrée) vers les unités de processe avec une pression de 3,24 bar.



Figure III.6: Pompe centrifuge P161A

III.3 Calcul hydraulique :

III.3.1 Caractéristique de la pompe (P161A) :

- Débit de refoulement : 125 m^3/h
- Hauteur de refoulement : 15 m

- **Diamètre de refoulement** : 100 mm
- **Longueur de la conduite** : 35 m
- **Pour une température de liquide sirop (eau sucrée) la viscosité dynamique environ de 150 CP = 150 milli pascal = 150×10^{-3} kg/m .s**
- **Masse volumique du liquide** : 1200 kg /m^3
- **Vitesse de rotation** : 2980 tr/min
- **Puissance absorbé** : $18.5 \times 10^3 \text{ w}$
- **Calcul de la vitesse moyenne d'écoulement:**

Elle est donnée par cette formule :
$$U = \frac{4Q_v}{\pi \times D^2} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

U : vitesse moyenne d'écoulement. (m/s)

Q_v : Le débit transitant dans la conduite. (m^3/s)

D : diamètre de la conduite. (m)

$$U = \frac{4 \times 125}{3600 \times 3.14 \times (0.1)^2} = 4.42 \text{ m/s}$$

➤ **Calcul du nombre de Reynolds :**

Il permet de déterminer le régime d'écoulement du fluide, donné par la relation suivante :

$$Re = \frac{\rho \times u \times D}{\mu} \quad (\text{III.2})$$

Avec :

μ : viscosité dynamique (kg /m.s)

ρ : masse volumique. (kg /m^3)

$$v = \frac{150 \times 10^{-3}}{1200} = 1.25 \times 10^{-4} \text{ m}^2/s$$

$$Re = \frac{1200 \times 4.42 \times (0.1)}{1.25 \times 10^{-4}} = 3536 ; Re \geq 2000 \text{ donc le régime est turbulent.}$$

➤ **Calcul coefficient de perte de charge λ :**

Pour le calcul du coefficient de perte de charge λ , On utilise souvent des formules empiriques plus simples valables pour des cas particuliers et dans un certain domaine du nombre de Reynolds.

Formule de Blasius :

$$\lambda = 0.316 \times Re^{-0.25} \quad (\text{III.3})$$

$$\lambda = 0.316 \times (5336)^{-0.25} = 0.04$$

Le calcul effectué donne un coefficient de frottement λ de 0.04. Ce coefficient est crucial pour évaluer les pertes de charge dans une conduite

➤ **Calcul de perte de charge linéaire Δhl :**

Les pertes de charges linéaires, sont des pertes de charge réparties régulièrement le long des conduites.

$$\Delta hl = \lambda \frac{l U^2}{D 2g} \quad (\text{III.4})$$

$$\Delta hl = 0.04 \times \frac{35}{0.1} \times \frac{(4.42)^2}{(2 \times 9.81)} = 13.94 \text{ mH}_2\text{O}$$

➤ **Calcul de pertes de charge singulière Δhs :**

On ajoute à la perte de charge linéaire, les pertes de charge singulière qui sont dues à la présence des singularités (coudes, vanne, clapets...etc.) et elles sont estimées à 15% des pertes de charge linéaire.

$$\Delta hs = 0.15 \Delta hl \quad (\text{III.5})$$

Avec :

Δhs : perte de charge singulière (mètre d'eau (mH₂O))

Δhl : perte charge linéaire (mètre d'eau (mH₂O))

$$\Delta hs = 0.15 \times 13.94 = 2.09 \text{ mH}_2\text{O}$$

➤ **Calcul de la hauteur manométrique totale H_{mano} :**

C'est la différence d'énergie entre l'entrée et la sortie de la pompe, elle est déterminée comme suit :

$$\mathbf{Hmt} = \mathbf{H_{théorique}} + \mathbf{\sum \text{perte charge}} \quad \mathbf{(III.6)}$$

$$\mathbf{Hmt} = \mathbf{15} + \mathbf{\sum(13.94 + 2.09)} = \mathbf{31.03 \text{ m}}$$

➤ **Calcul la puissance utile P_u :**

La puissance utile d'une pompe est la puissance mécanique transmise au fluide par la pompe. C'est la puissance réellement disponible pour transporter le fluide.

$$\mathbf{P_u} = \mathbf{\rho \times g \times Hmt \times Q_v} \quad \mathbf{(III.7)}$$

$$\mathbf{P_u} = \mathbf{1200 \times 9.81 \times 31.03 \times \frac{125}{3600}} = \mathbf{12683.5 \text{ w}}$$

$$\mathbf{Pu=12.68 \text{ kw}}$$

Donc la puissance utile de la pompe inférieure ou égale la puissance théorique

➤ **Calcul le rendement globale η_g :**

Le rendement global est un paramètre crucial qui indique l'efficacité avec laquelle une pompe convertit la puissance d'entrée en puissance de sortie utile.

$$\mathbf{\eta_g} = \frac{\mathbf{\rho \times g \times Hmt \times Q_v}}{\mathbf{P_m}} \quad \mathbf{(III.8)}$$

$$\mathbf{\eta_g} = \frac{\mathbf{1200 \times 9.81 \times 31.03 \times 125}}{\mathbf{18.5 \times 10^3 \times 3600}} = \mathbf{0.68}$$

$$\mathbf{\eta_g} = \mathbf{68\%}$$

III.3.1 Interprétation :

Après vérification des calculs concernant la pompe KSB, il a été confirmé que le régime d'écoulement est turbulent, avec un nombre de Reynolds supérieur à 2000. Par conséquent, la puissance utile de la pompe est inférieure ou égale à la puissance théorique. Nos calculs montrent que le rendement global de la pompe est très proche du rendement réel de 72% indiqué

par le constructeur. Ces résultats indiquent que la pompe fonctionne de manière satisfaisante et qu'elle répond adéquatement aux exigences de l'unité de production de sucre. En somme, la pompe KSB remplit ses fonctions avec une efficacité conforme aux spécifications techniques attendues, assurant ainsi un fonctionnement optimal pour l'application.

III.4 Conclusion :

En conclusion, une évaluation complète des performances d'une pompe KSB nécessite une combinaison d'analyses théoriques et de validations pratiques. Cette approche permet de garantir que la pompe fonctionne efficacement et de manière fiable, tout en répondant aux besoins spécifiques de son application



**Chapitre IV : Analyse de fiabilité et
optimisation de maintenance préventive**

IV.1 Introduction :

Ce chapitre explore l'analyse de la fiabilité et l'optimisation de la maintenance préventive pour les pompes, en fournissant un cadre méthodologique pour améliorer leur performance et prolonger leur durée de vie. L'analyse de la fiabilité permet d'identifier les modes de défaillance potentiels et de comprendre les facteurs qui influencent les performances de la pompe. En parallèle, la maintenance préventive vise à anticiper et à éviter les pannes avant qu'elles ne surviennent, en mettant en œuvre des interventions planifiées basées sur les données de fiabilité et d'utilisation.

IV.1.1 Généralités sur la maintenance :

IV.1.1.1 Définition :

La maintenance est un ensemble d'actions techniques, administratives et de management destinées à maintenir ou à rétablir un bien dans un état où il peut accomplir la fonction requise.

IV.1.1.2 Rôle de la maintenance :

Le rôle de la maintenance consiste à appliquer le célèbre proverbe « il est préférable de prévenir plutôt que de guérir ». La maintenance vise donc à assurer le bon fonctionnement des outils de production tout en diminuant les dépenses liées à la production. Afin de faire face aux défis économiques grandissants, elle peut être utilisée pour optimiser, voire générer des bénéfices. [31]

IV.1.1.3 Types de maintenance :

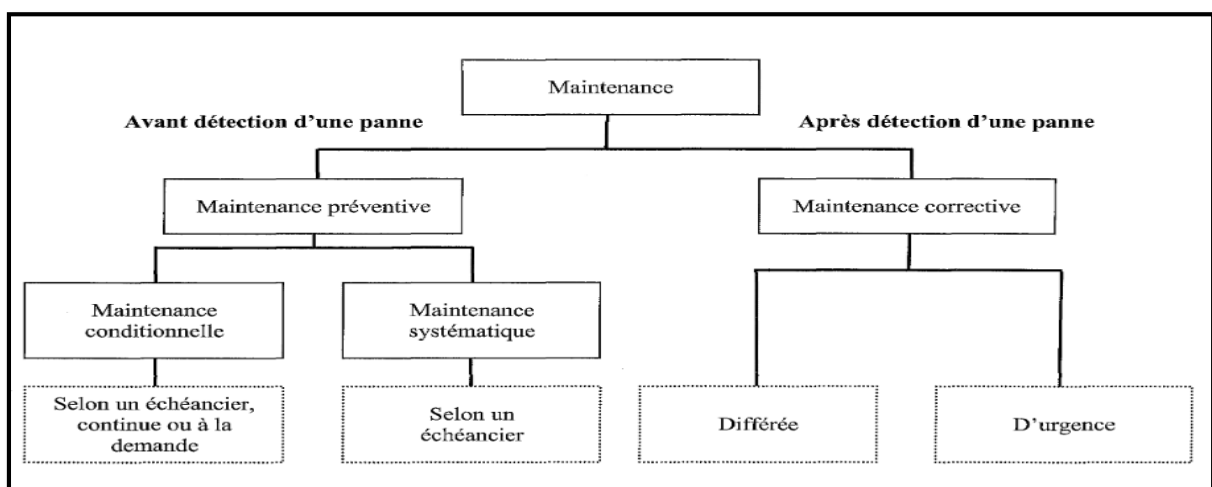


Figure IV.1: Annexe A de la norme NF EN 13306 X 60-319 de juin 2001 [32]

IV.1.1.3.1 Maintenance préventive :

Maintenance qui vise à réduire les risques de panne ou de dégradation des biens ou services proposés. Les activités correspondantes sont planifiées en fonction d'un nombre prédéfini d'unités d'utilisation (maintenance du système) et/ou de critères prédéfinis importants pour évaluer l'état dégradé du bien ou du service (maintenance conditionnelle). [32]

Nous pouvons citer différents types, qui sont :

➤ **Maintenance préventive systématique :**

A des périodes prédéfinies ou en fonction du nombre spécifique d'unités utilisées sans avoir effectué une vérification préalable de l'état des actifs.

Bien que le temps soit la mesure la plus fréquente, d'autres mesures peuvent être employées, comme la quantité de produits fabriqués, la longueur des produits fabriqués, la distance de course, la qualité du produit fabriqué, le nombre de cycles effectués, etc. On détermine la fréquence de cette intervention lors de la mise en service ou après un certain temps. Révision entière ou en partie. [32]

➤ **Maintenance préventive conditionnelle :**

La maintenance préventive repose sur la surveillance du bon fonctionnement des actifs et/ou des installations. L'un des paramètres essentiels de cette opération est l'opération résultat. Cette Il est possible d'effectuer le fonctionnement et la surveillance des paramètres selon un calendrier, que ce soit à la demande ou en continu. [32]

➤ **Maintenance préventive prévisionnelle :**

Il s'agit d'un entretien préventif qui demande une évaluation de l'évolution de la surveillance.

Précisions sur les facteurs clés de la détérioration des biens, favorisant des retards et une planification. Contribuer à certaines notions fondamentales concernant la maintenance. [32]

IV.1.1.3.2 Maintenance corrective:

Toutes les mesures prises après la faillite ou la détérioration des biens. Responsabilités qui lui permettent de garantir, au moins temporairement, la fonction désirée : ces Les tâches incluent la détection et le diagnostic du défaut, ainsi que la remise en état. Assurez-vous qu'il fonctionne, qu'il soit modifié ou non. [33]

Ce type de maintenance peut se diviser en plusieurs types, qui sont :

➤ **Maintenance palliative :**

Les opérations de maintenance corrective élaborées afin de permettre au projet de mettre en place temporairement tout ou une partie de la fonctionnalité désirée. Fréquemment désignée sous le nom de dépannage, la maintenance palliative implique principalement des mesures temporaires. Un traitement est nécessaire. [33]

➤ **Maintenance curative:**

Ce genre de maintenance permet de rétablir le système de manière permanente après l'apparition d'une panne. Elle se distingue par la recherche des origines d'une panne afin de réparer l'équipement. La réparation du système est une intervention durable. [33]

IV.1.1.2 Objectifs opérationnels de la maintenance :

- Garantir une disponibilité optimale à un prix abordable.
- Résoudre les pannes à tout moment et à un prix abordable.
- Améliorer la longévité des biens.
- Changer le bien à des moments spécifiques.
- Garantir un fonctionnement sécurisé et efficace du bien.
- Maintenir une présentation assez satisfaisante.
- Conserver le bien dans un état impeccable.

IV.2 Généralités sur la fiabilité :

IV.2.1 Définition :

La sécurité d'un ensemble d'éléments à un moment t correspond à la probabilité qu'il fonctionne sans problème pendant la période $[0, t]$. [34]

IV.2.2 Fonctions de répartition et de fiabilité :

La probabilité d'avoir au moins une panne avant le temps t est représentée par la fonction de répartition $F(t)$, tandis que la fonction de fiabilité notée $R(t)$ représente la probabilité de fonctionner sans défaillance pendant la période $[0, t]$, $R(t) = 1 - F(t) = P(T > t)$ [5] (IV.1)

IV.2.3 Principales lois de probabilités utilisées en fiabilité :

Les lois les plus utilisées en fiabilité sont: la loi exponentielle, la loi normale, la loi de Weibull et la loi Gamma.

IV.2.3.1 Loi exponentielle :

La loi exponentielle est souvent employée dans le domaine de la fiabilité, en particulier dans le domaine de l'électronique. Cette règle est valable pendant la durée de vie du dispositif pendant laquelle le taux de défaillance instantané $\lambda(t) = \lambda$ est constant et les défaillances se produisent de manière spontanée.

Les caractéristiques d'une variable aléatoire T distribuée suivant une loi exponentielle sont:

$$\text{-Fonction de répartition: } \mathbf{R(t) = 1 - F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad t \geq 0} \quad \text{(IV.2)}$$

$$\text{-Densité de probabilité: } \mathbf{f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad t \geq 0} \quad [5] \quad \text{(IV.3)}$$

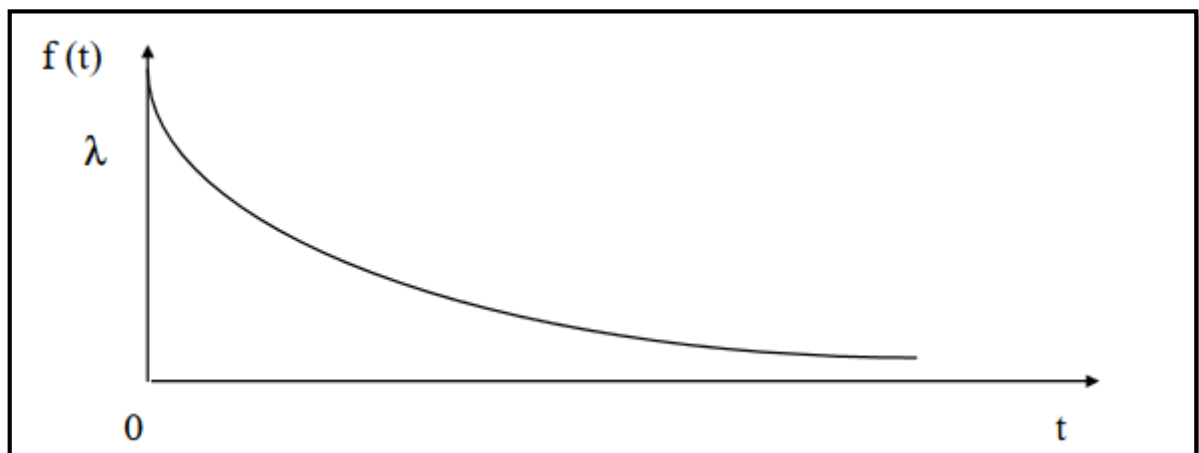


Figure IV. 2: Fonction de densité de probabilité - Loi exponentielle [35]

IV.2.3.2 Loi normal :

En général, la loi normale s'applique à une variable aléatoire continue représentée par toutes les valeurs qu'elle prend et qui ne peuvent pas être dénombrées (un intervalle). Par exemple, la glycémie, le cholestérol, le poids...

Elle se distingue par deux éléments : la moyenne et l'écart type. [36]

IV.2.3.2.1 Notions fondamentales :

- Courbe en forme de cloche.
- Symétrique.
- Mode, moyenne et médiane se confondent.
- Caractérisée par sa moyenne (m) et son écart-type (s).
- N (m,s)

- Loi normal = loi de probabilité : $f(x) = \frac{e^{-\frac{(x-m)^2}{2s^2}}}{s\sqrt{2\pi}}$ (IV.4)

IV.2.3.3 Loi gamma :

On dit que X suit la loi gamma de paramètres $p > 0$ et $\lambda > 0$, notée $\Gamma(p, \lambda)$, si elle admet pour densité :

$$f(x) = \begin{cases} \frac{\lambda \cdot e^{-\lambda x} \cdot (\lambda x)^{p-1}}{\Gamma(p)}, & \text{si } x > 0 \\ 0 & \text{Sinon} \end{cases} \quad [7] \quad (\text{IV.5})$$

IV.2.3.4 Loi de Weibull :

La loi de Weibull représente l'idée d'un taux de défaillance instantané, qui est une fonction de puissance du temps. Par ailleurs, elle fait également partie des catégories de lois asymptotiques des valeurs extrêmes. Elle s'impose de plus en plus dans le domaine mécanique. Elle est extrêmement adaptable à différentes distributions et permet de représenter de manière alternée les trois phases de la vie d'un dispositif (période de jeunesse, de vie utile ou de vieillesse). [35]

IV.2.3.4.1 Paramètres de la loi de Weibull (β, η, γ) :

- **β Paramètre de forme :**

- si $\beta < 1$, le taux de défaillance décroît;

- si $\beta = 1$, le taux de défaillance est constant, on retrouve la loi exponentielle;
- si $\beta > 1$, le taux de défaillance croît;
- si $\beta \rightarrow 3.6$, la loi de Weibull a une allure voisine mais distincte de la normale. [35]

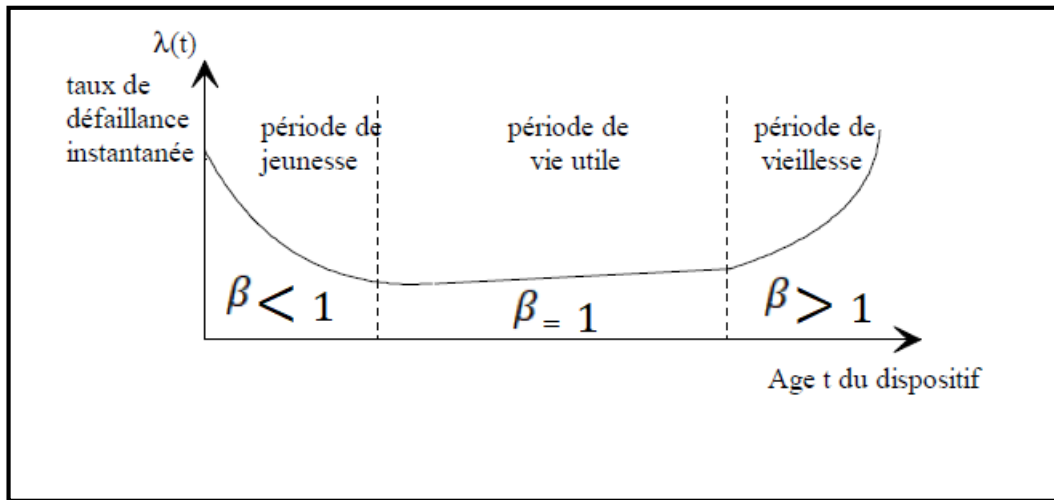


Figure IV.3: Variation de l'évolution du taux instantané en fonction de β - Loi de Weibull.

[35]

➤ **η Simple paramètre d'échelle de temps :**

La durée de vie est caractéristique, Lorsque $t - \gamma = \eta$, alors $F(t) = 63\%$. [35]

➤ **γ Paramètre de localisation :**

Même unité que le temps ; fréquemment, on opte pour $\gamma = 0$ et la loi de Weibull est prise à deux paramètres. [35]

IV.2.3.4.2 Caractéristiques d'une variable aléatoire T distribuée par loi de Weibull :

- Fonction de fiabilité:

La probabilité qu'un composant ou un système fonctionne correctement jusqu'à un temps t sans subir de défaillance.

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad \forall t \geq \gamma \quad (\text{IV.6})$$

- Densité de probabilité:

Cette fonction est essentielle pour décrire la probabilité qu'une variable aléatoire prenne une certaine valeur.

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta}} \quad \forall t \geq \gamma \quad (\text{IV.7})$$

- Taux instantané de défaillance:

Une mesure essentielle pour comprendre, gérer et améliorer la fiabilité des systèmes et des composants. Il aide à prendre des décisions informées concernant la maintenance, la conception, la qualité, et la gestion des opérations.

$$\lambda(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (\text{IV.8})$$

IV.2.3.4.3 Estimation de la fonction de survie :

Il existe deux types d'estimation :

1. Estimation non paramétrique de la fonction de survie :

Généralement on utilise deux méthodes :

- Méthode des rangs médians: est utilisé lorsque la taille de l'échantillon N est inférieure à 20 :

$$F_i(t) = \frac{i-0.3}{N+0.4} \quad (\text{IV.9})$$

- Méthode des rangs moyens : elle est utilisée lorsque la taille de l'échantillon N est supérieure à 20 :

$$F_i(t) = \frac{i}{N+1} \quad (\text{IV.10})$$

2. Estimation paramétrique de la fonction de survie :

Quand on veut adapter un modèle paramétrique à un échantillon de données de survie, il est nécessaire de sélectionner le modèle adéquat. Après avoir sélectionné la forme du modèle en fonction de critères physiques et de connaissances préalables, il reste à identifier le modèle en estimant ses paramètres. Pour ce faire, nous avons différentes approches à notre disposition et généralement on utilise la méthode graphique :

- Méthode graphique : Avec un papier à échelles fonctionnelles dit « papier de Weibull» ou graphique « d 'Allen-Plait » pour la loi de Weibull.

IV.2.4 Exploitation de l'historique :

L'historique de panne : le traitement des données primaires de l'historique de la pompe commence par un calcul du temps de bon fonctionnement TBF.

IV.2.4.1 Historique de la pompe P161A :

Voici un tableau qui montre le nombre d'intervention et le temps qu'a pris chaque intervention.

Tableau IV .1 : L'historique de panne de la pompe P161A

N°	Description de l'intervention	Date de début	Date de fin	Type d'intervention	Heures réalisées
1	Intervention Préventive Semestrielle P161A	13/03/20 24 12:50	17/03/20 24 12:07	PREV	0,166666 667
2	Défaut variateur de la P161A	18/01/20 24 19:10	19/01/20 24 01:10	CORR	12
3	Intervention Préventive Annuelle P161A	09/01/20 24 22:30	09/01/20 24 23:00	PREV	1
4	Echauffement des paliers de la pompe	09/01/20 24 03:00	09/01/20 24 07:41	CORR	1
5	Esure de l'accouplement P161S	08/01/20 24 22:00	10/01/20 24 21:23	CORR	12
6	Pompe ne débite pas	08/01/20 24 16:12	08/01/20 24 16:52	CORR	1,33
7	Réparation de la pompe au niveau d'atelier	25/12/20 23 13:00	26/12/20 23 12:00	R_ATL	7

N°	Description de l'intervention	Date de début	Date de fin	Type d'intervention	Heures réalisées
8	Réarmement de la P161A	24/12/20 23 07:30	24/12/20 23 08:30	CORR	1
9	Pompe bloqué	14/12/20 23 09:50	14/12/20 23 10:50	CORR	2
10	Blocage de la pompe P161A	14/12/20 23 05:30	14/12/20 23 06:30	CORR	4
11	Défaut réponse de marche de la pompe P161A	03/11/20 23 09:49	03/11/20 23 10:49	CORR	3
12	Travaux sur la pompe de recirculation P161 du fondoir M160	17/10/20 23 06:10	17/10/20 23 07:10	CORR	6
13	Bruit anormal au niveau de la P161	18/09/20 23 01:05	10/10/20 23 06:55	CORR	3
14	Intervention Préventive Semestrielle P161A	10/09/20 23 00:06	18/09/20 23 06:43	PREV	3
15	Blocage de la P161A	18/08/20 23 17:05	18/08/20 23 18:05	CORR	4
16	Accouplement cisailé	05/08/20 23 13:50	05/08/20 23 14:50	CORR	8
17	Vérifier la pompe	02/08/20 23 22:30	02/08/20 23 22:59	CORR	0,966666 667
18	Elimination point chauds de Cait TGBT1	30/07/20 23 15:58	10/10/20 23 06:55	CORR	2
19	Réparation de la pompe P161A	14/07/20 23 17:48	18/09/20 23 06:43	R_ATL	11
20	Changement de pompe P161	10/07/20 23 18:34	10/07/20 23 19:34	CORR	5

N°	Description de l'intervention	Date de début	Date de fin	Type d'intervention	Heures réalisées
21	Pompe ne débite pas	21/06/20 23 10:23	21/06/20 23 11:23	CORR	2
22	Moteur de a P160S grillé	19/04/20 23 22:15	19/04/20 23 23:15	CORR	4
23	Réparation de la pompe P161A	05/04/20 23 08:50	07/06/20 23 16:25	R_ATL	8
24	P161 remontage du moteur	01/04/20 23 17:04	01/04/20 23 18:04	CORR	9
25	P161 défaut thermique	26/03/20 23 18:15	26/03/20 23 19:15	CORR	4
26	Réparation de la pompe	20/03/20 23 16:16	30/03/20 23 12:27	R_ATL	11

IV.3 Partie calcul :

IV.3.1 Calcul de fiabilité :

Pour une vision complète et précise de la fiabilité des systèmes, ce qui est essentiel pour la prise de décisions informées en matière de maintenance et de gestion des risques, La méthode de Weibull est préférée pour son adaptabilité, sa capacité à gérer des données complexes et censurées et ses outils disponibles qui facilitent son application pratique.

C'est pour cela qu'on a choisi cette méthode pour calculer la fiabilité de notre pompe.

IV.3.1.1 Calcul des paramètres de Weibull :

Le tableau suivant comporte les temps de bon fonctionnement (TBF) classés par ordre croissant, et les $F_i(t)$ calculés par la méthode des ranges médians $F_i(t) = \frac{i-0.3}{N+0.4}$ (dans notre cas $N = 16 \leq 20$).

Avec :

$F_i(t)$: méthode de range medians

N : la taille d'échantillons :

i : la quantité

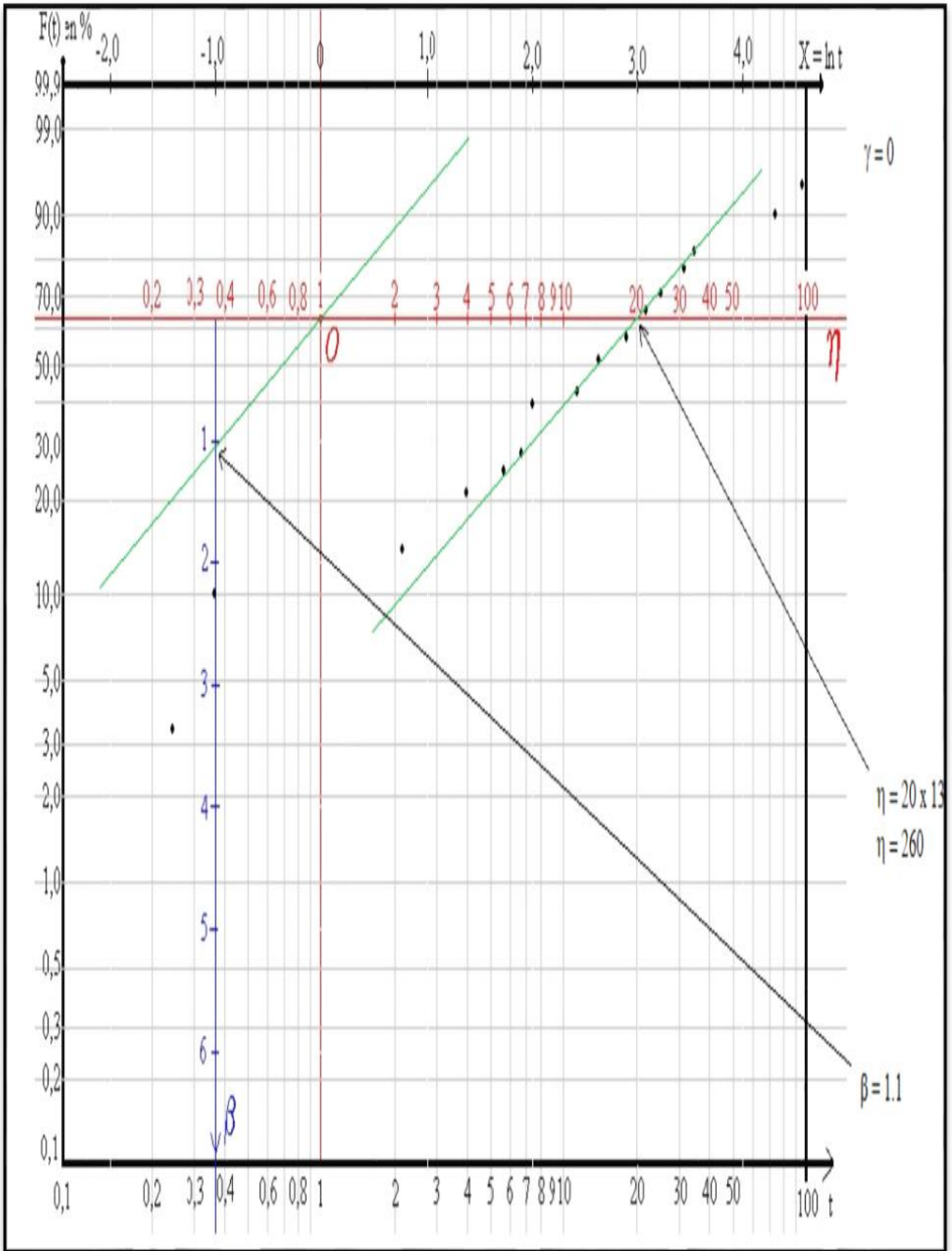


Figure IV.4: papier de weibull

Tableau IV .2 : Les temps de bon fonctionnement classés en ordre

I	TBF(t)	$\frac{\text{TBF}(i)}{13}$	F(t)	F(t) %
1	3,33	0.2562	0.04268	4.27
2	5,13	0.3946	0.10366	10.37
3	28,5	2.1923	0.16463	16.46
4	52,62	4.0408	0.22561	22.56
5	76,1	5.8538	0.28659	28.66
6	86,77	6.6746	0.34757	34.76
7	96,23	7.4023	0.40854	40.85
8	167,25	12.8654	0.46951	46.95
9	189,78	14.5985	0.53049	53.05
10	236,67	18.2054	0.59146	59.15
11	316,2	24.3231	0.65244	65.24
12	330,3	25.4092	0.71341	71.34
13	410,65	31.5897	0.77439	77.44
14	463,18	35.6292	0.83537	83.54
15	978,68	75.2823	0.89634	89.63
16	1295,67	99.6677	0.95732	95.73

- **Recherche de η :**

Le paramètre d'échelle η est donc l'abscisse t à laquelle la droite de régression coupe la droite horizontale $F = 63,2$.

$$\text{On a : } \eta = 20 \times 13 = 260$$

- **Recherche de β :**

On trace une droite parallèle à la droite de corrélation, et passant par $\eta = 1$ On lit ensuite béta sur l'axe B.

$$\text{On a : } \beta = 1.1$$

Donc notre système est en période de vieillesse.

- **Recherche de γ :**

Nos points font une droite donc dans notre cas :

$$\gamma = 0$$

IV.3.1.2 Calcul du l'espérance mathématique E(t) :

$$E(t) = \text{MTBF} = \gamma + \eta \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (\text{IV.11})$$

Sachant que :

$$\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = \Gamma\left(1 + \frac{1}{1.1}\right)$$

$$\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) = \Gamma 1.91$$

$$\Gamma 1.91 = 0.96177 \quad (\text{voir la table de loi de gamma})$$

Donc :

$$E(t) = \text{MTBF} = 0 + 260 \times 0.96177 = 250.01 \text{ heures}$$

Avec :

MTBF : Moyenne des temps de bon fonctionnement

IV.3.1.3 Application des lois de Weibull :

La MTBF est une mesure centrale qui donne une idée moyenne du temps entre les défaillances pour un système ou un composant. Calculer la fiabilité à ce point fournit une estimation représentative de la performance globale du système.

➤ Fonction de fiabilité:

$$R_{(t=\text{MTBF})} = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (\text{IV.10})$$

$$R_{(t=\text{MTBF})} = e^{-\left(\frac{250.01-0}{260}\right)^{1.1}}$$

$$R_{(t=MTBF)} = 0.3837297435$$

$$R_{(t=MTBF)} = 38.37\%$$

IV.3.1.4 Interprétation :

Après calcul de fonction de fiabilité de la pompe aux temps $t=MTBF$, on résoudre que la valeur est satisfaisante donc on peut dire que la pompe est fiable à $t=MTBF$. Quand on dit que la valeur de la fonction de fiabilité à $t = MTBF$ est satisfaisante, cela signifie que cette valeur est acceptable dans le contexte des exigences de fiabilité de la pompe. Pour de nombreux systèmes, une probabilité de survie d'environ 38,7 % à $t = MTBF$ est considérée comme satisfaisante, car elle est en ligne avec les attentes statistiques pour des systèmes avec des MTBF donnés.

➤ Taux instantané de défaillance:

Les données sur le taux de défaillance sont cruciales pour les ingénieurs et les concepteurs. Elles permettent d'identifier les faiblesses des produits et d'apporter des améliorations pour augmenter la fiabilité et la qualité.

$$\lambda(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right) \cdot \left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (\text{IV.11})$$

$$\lambda(t) = \left(\frac{1.1}{260}\right) \cdot \left(\frac{t-0}{260}\right)^{1.1-1}$$

Tableau IV .3: Les TBF_i et les taux de défaillance $\lambda(t)$

TBF(t)	$\lambda(t)$
3,33	0.000149
5,13	0.000230
28,5	0.001293
52,62	0.002395
76.1	0.003461
86,77	0.003939
96,23	0.004381
167,25	0.007563
189,78	0.008693

TBF(t)	$\lambda(t)$
236,67	0.010929
316,2	0.014941
330,3	0.015643
410,65	0.019438
463,18	0.021972
978,68	0.046404
1295,67	0.061960

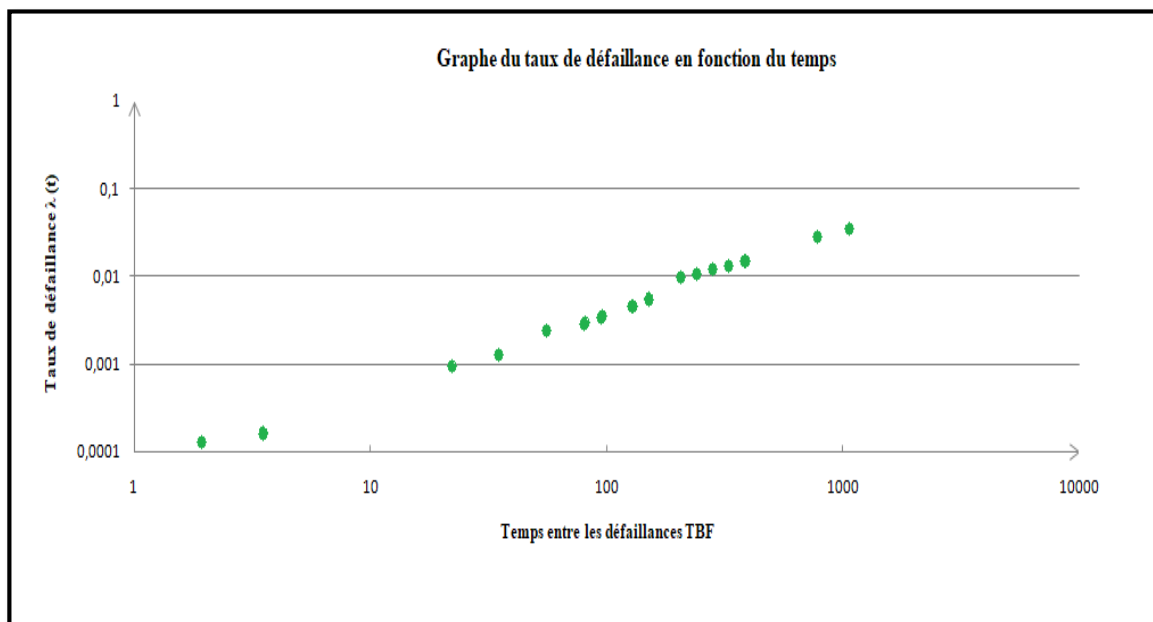


Figure IV. 5: Graphe du taux de défaillance en fonction du temps

IV.3.1.5 Interprétation :

Le taux instantané de défaillance tend vers une droite, cela conduit une stabilité de la fiabilité dans le temps et une distribution spécifique des défaillances.

IV.4 Conclusion :

En conclusion, l'analyse de la fiabilité et l'optimisation de la maintenance préventive des pompes constituent des éléments essentiels pour garantir leur performance optimale et prolonger leur durée de vie.



Conclusion générale

Conclusion générale

En conclusion, cette étude a pour objectif d'offrir une vue d'ensemble intégrée et détaillée sur les divers aspects des pompes centrifuges, analysées en termes de critères de performance et d'application pratique. Il met en lumière l'importance des variateurs de vitesse pour le contrôle des moteurs électriques des pompes centrifuges, soulignant leurs bénéfices en matière de performance énergétique, de réduction des coûts d'exploitation, et de prolongation de la durée de vie des équipements.

L'intégration technique des variateurs de vitesse, incluant les connexions physiques et électriques, les modes de contrôle, et les stratégies de maintenance, est également détaillée. En outre, une évaluation théorique et pratique de la pompe KSB a démontré son rendement satisfaisant, conforme aux spécifications du constructeur, notamment dans une unité de production de sucre.

Enfin, le mémoire propose un cadre méthodologique pour l'analyse de la fiabilité des pompes et l'optimisation de la maintenance préventive, visant à améliorer la fiabilité, réduire les coûts opérationnels, et augmenter la sécurité des opérations.

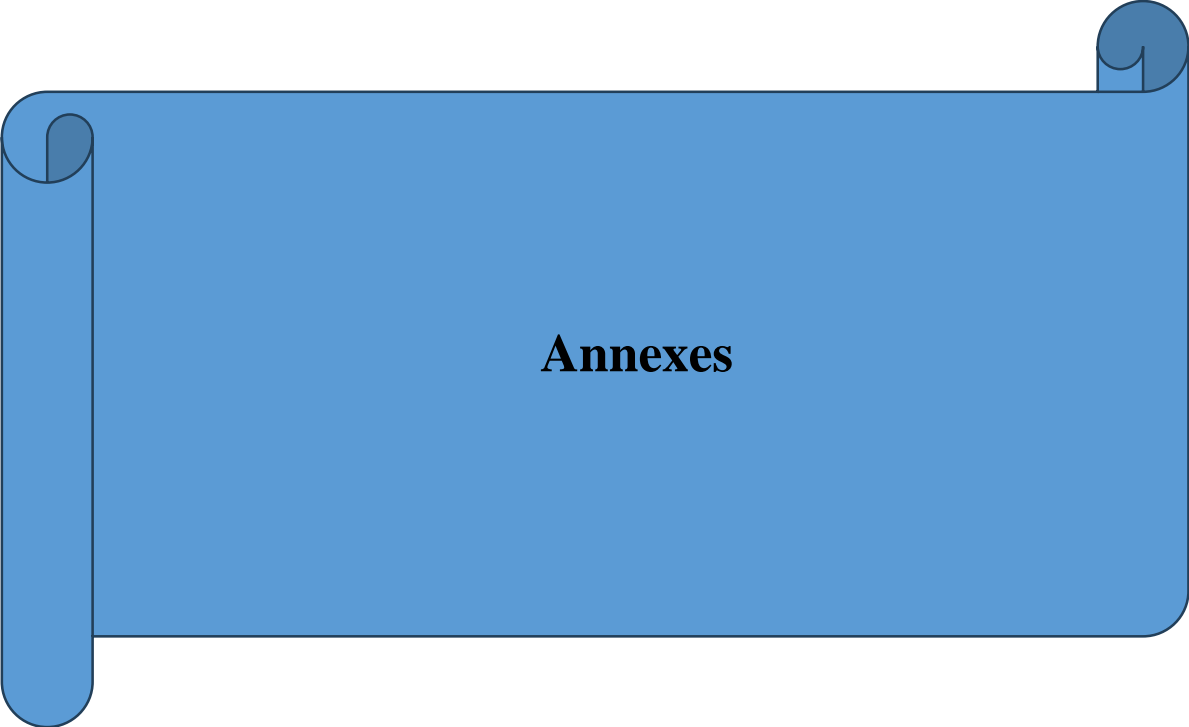


Références bibliographiques

- [1] : Documentation du SPA Cevital de Béjaïa.
- [2] : Joël Metogbé Zinsalo, cours de « Pompes et stations de pompage », Université d'Abomey-Calavi.
- [3] : A. Hussine, cours de « Machine Hydraulique », Université de Hassiba Benbouali de Chlef.
- [4] : Mohamed Yazid Belghit, cours de « Pompes et compresseurs », Université Echahid Hamma Lakhdar - El Oued.
- [5] : R. Saker Ouargli, cours sur « Pompes, compresseurs et turbines pour nouveaux ingénieurs ».
- [6] : Cours sur les généralités sur la maintenance des pompes, Université de Tiaret.
- [7] : Cours d'hydraulique : De la mécanique des fluides à la transmission de puissance, Université de Limoges.
- [8] : Kedjough Ismail et Khattab Redouane, « Etude, Conception et simulation d'une pompe centrifuge » Mémoire de fin d'étude master, Université de DE KASDI MERBAH.
- [9] : Fawaz Benhassir, « Entraînement des pompes centrifuges à vitesse variable pour réduire la consommation d'énergie » Mémoire fin d'étude master, Université BADJI MOKHTAR - ANNABA, 2019/2020.
- [10] : Bouguerne Ammar. Chapitre 1 : Notions générales, définitions et classifications des pompes. Université Batna 2.
- [11] : Remache Fares, « Etude du régime rationnel de fonctionnement d'une pompe centrifuge avec vitesse variable par MLI » Mémoire fin d'étude master, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [12] : Cours « les généralités sur la maintenance des pompes », université de ouargla.
- [13] : Annexe : Cours de « mécanique des fluides sur les pompes centrifuges ».
- [14] : Bigot, Pascal. Cours sur la pompe.
- [15] : Djellali Badis et Djebabla Basma, « Analyse Des Causes De Défaillance des Pompes Centrifuges » Mémoire fin d'étude master, Université BADJI MOKHTAR - ANNABA, 2020/2021.


- [16] : Meftah Ali, « Etude de la cavitation dans une pompe centrifuge» Mémoire fin d'étude master, Université SAAD DAHLAB de Blida, 2013/2014.
- [17] : Amar.Z, « Cours de Systèmes Hydrauliques et Pneumatiques », Université Hassiba Ben Bouali de Chlef 2017.
- [18] : « Cours Turbomachine » 1ère année STS Maintenance, institut Supérieur de Technologie de Marseille, 2023.
- [19] : CARLIER. M, « Machines hydrauliques », France : ENGRFE,P 25, 32,48(1968).
- [20] : « Cours Pompes et stations de pompage », Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi, Bordj Bouarreridj 2023.
- [21]: KENZA AOUI « Calculs des performances et dimensionnement d'une pompe hydraulique » Mémoire fin d'étude Master, Université M'hamed Bougara Boumerdes, 2017/2018.
- [22] : Smith J, et Brown A, « Cours Développement d'un outil numérique améliorant la conception et les performances des centrifuge multi étage », Université Technologique de Villeurbanne 2023.
- [23] : Amoura Mohammed « Etude électromagnétique et thermique des machines électriques » Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme D'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique (ENP) d'Alger, 2017/2018.
- [24] : Chouchéne. M, « Cours des circuits hydrauliques », Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi Bordj Bouarreridj 2023.
- [25] : « Manuel de démarrage des pompes avec variateur de vitesse », Document Schlumberger 2007.
- [26] : Marouf Zineb « Régulation de pompes à l'aide d'un variateur de vitesse» Mémoire de projet de fin d'études pour l'obtention du diplôme D'Ingénieur d'Etat en Electrotechnique, Ecole Nationale Polytechnique (ENP) d'Alger, 2016/2017.
- [27] : Adel Ben Aicha et Tamim Defrou, « Réglage des paramètres des pompes centrifuge à vitesse Variable », mémoire de fin étude master,2018/2019.
- [28] :Boulet.P, « Étude du moteur asynchrone d'induction triphasé possédant des condensateurs dans ses phases rotoriques », Thèse de doctorat Université de Béthune ,1980.

- [29] : AIT AMARA Amirouche et SAD CHAOUICHE Said, « Commande par orientation du flux D'une machine asynchrone » Mémoire de Fin d'Etude de master, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou ,2016/2017.
- [30] : Bendaoud, Cours de « Théorie des Machines Asynchrones » , Université de Sidi Bel Abbès
- [31] : Toumi Sofiane et Zahaf Saddam Houcine, «Maintenance et fiabilité des pompes centrifuges » Mémoire de fin d'étude Master, Université de Mostaganem UMAB, 2022.
- [32] : Llaurens. J, « Mise en place d'un plan de maintenance préventive sur un site de production pharmaceutique », thèse de doctorat, Université Josephe Fourier Grenoble, 2011.
- [33] : Arkoub Thilleli et Cherfaoui Lila «Optimisation de la maintenance préventive de système du Parc de stockage» Mémoire de fin d'étude Master, Université Abderahmane Mira de Béjaia, 2020/2021.
- [34] : Mathieu.G, « Modélisation des coûts de cycle de vie prévision des coûts de maintenance et de la fiabilité Application à l'aéronautique », Thèse de doctorat d'Ecole centrale de Lyon, 2005.
- [35] : LAGGOUNE, Cour de fiabilité industrielle dans « Organisation et gestion de la maintenance industrielle », université de Béjaia 2020/2021.
- [36] : Cour de « La loi normal » université Ferhat Abbas, Sétif.
- [37]: Arnaud Jobin, Cour de « Propriétés des lois Gamma, gamma et d'Erlang (HP) », 2019/2020.



Annexe

Fiche technique :

		KSB 	
SPECIFICATION TECHNIQUE			
Date:	04.04.01	No. d'offre	V.3.3.0 4000019958
No. de demande	CEVITAL ALGERIE	Poste	2
Repère client	P161A/P161/P201		
PPE CHIMIE NORM. ISO 2858/ISO 5199		Nombre pièces	3
CPKS1 100-315		Entrainement	Moteur-E
CARACT. DE SERVICE			
Débit	110,00 m3/h	Produit véhiculé Sirop brut	
Débit min. adm.	10,5 m3/h	Température t/s	80,0 °C
Bypass requis	0,00 m3/h	Densité t/s	1,320 kg/dm3
Hauteur refoulem.	25,00 m	Viscosité cinémat.	10,0 mm2/s
NPSH installation	m	Vitesse nominale	1460 1/min
NPSH pompe	1,70 m	Rendement	72,1 %
Pression aspirat.	0,00 bar	Puissance pompe	13,7 kW
Press. sortie ppe.	3,24 bar	Puissance moteur	18,50 kW
Pression serv. adm.t/s	16,0 bar		
EXECUTION			
Diamètre de roue	283 mm	Etan. d'arbre	GM couvenc. A
Bride aspir. DN 125	axial	Marque	BURGMANN
Bride refoul. DN 100	haut	Type	HRZ1
Usinée selon PN 16	EN 1092-2	Code matériau	Q1Q1VGG
		Plan de montage	W
Support de palier	P04S	balayage / bague d'étanchéité	
ACCESSOIRES			
Accoupl.	Eupex	Moteur-E IM B3	50 Hz, 400/690V
Type / taille	N-H/125	Taille IEC/cl.is.	180M / F
Douille intermédiaire	140 mm	Protect. moteur	IP55
Plaque d'assise pour pompe / moteur		Classe températ.	
		prot. moteur par 3 thermistors	PTC
		Moteur de marque du choix KSB	
		Entrainement fourni par KSB	
MATERIAUX			
Volute	JS1025	Couvercle GM	1.4571
Couvercle de corps	C22.8	Joints	PTFE-GF25
Roue	JS1030	Plaque d'assise	Acier
Lanterne-palier	JL1040	Accoupl.	JL1040
Bague d'usure	JL1040	Prot. d'accoupl.	Acier
Arbre	C45+N		
Chemise d'arbre	1.4571		

Annexe 1. Table de la loi de Gamma

x	$\Gamma(x)$	X	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$	x	$\Gamma(x)$
1	1.0000	1.5	0.8862	2	1.0000	2.5	1.3293
1.1	0.9514	1.6	0.8935	2.1	1.0465	2.6	1.4296
1.2	0.9182	1.7	0.9086	2.2	1.1018	2.7	1.5447
1.3	0.8975	1.8	0.9314	2.3	1.1667	2.8	1.6765
1.4	0.8873	1.9	0.9618	2.4	1.2422	2.9	1.8274

