République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التـــعلـــيـــــم العـــــالـــــي والبـــحـــــث العـلمـــي

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

محمد بن أ حمد 2 جامعة وهران

Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة والأمن الصناعي

Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

Département de Maintenance en Instrumentation

MÉMOIRE

Pour obtention du diplôme de Master

Filière : Génie Industriel

Spécialité : Maintenance de l'Automatisme et de l'Instrumentation

Thème

Modernisation et optimisation de l'efficacité énergétique d'une station de pompage hydraulique par l'intégration de variateurs de fréquence (VFD) et boucle de contrôle PID automatisées

Présenté et soutenu publiquement par :

Belhaoua Hadjer

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grad	Etablissement	Qualité
Mm. Arbi Maachia	MCB	Univ. Oran-2, IMSI	Présidente
Mm. Djelghoume Farida	MCA	Univ. Oran-2, IMSI	Examinateur
Mm . Haimour Rachida	MCB	Univ. Oran-2, IMSI	Encadrante

Année universitaire :2026/2027.

Remerciement

Avant toute chose, je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant, qui m'a offert la force, la patience et l'inspiration nécessaires pour mener à bien ce projet.

Je souhaite également exprimer ma profonde gratitude à mon encadrante universitaire, Mme. Haimour Rachida, pour son encadrement rigoureux, ses conseils avisés et son soutien tout au long de ce travail. Son expertise et son implication ont été d'une grande importance pour la réussite de ce projet.

Mes remerciements vont aussi à mon encadrant de l'entreprise, M.Goulmane Abderrazak, ainsi qu'au personnel de l'usine de dessalement de Sonactar (Mostaganem pour leur accueil, leur collaboration, et les informations techniques qu'ils ont bien voulu partager, et qui ont grandement contribué à la compréhension du processus étudié**.**

Je remercie tout particulièrement les membres du jury pour le temps qu'ils consacrent à l'évaluation de ce travail, ainsi que pour leurs remarques et suggestions qui contribueront à mon amélioration personnelle et professionnelle. Enfin, j'adresse ma gratitude à l'ensemble du corps enseignant et au personnel administratif et technique de l'Institut de Maintenance et Sécurité Industrielle, pour leur disponibilité, leur bienveillance et leur professionnalisme tout au long de mon parcours académique.

Je n'oublie pas non plus toutes les personnes croisées sur ce chemin, qui m'ont offert un regard bienveillant, un mot d'encouragement ou une aide inattendue. Leur générosité a laissé une empreinte durable.

À toutes et à tous, merci du fond du cœur

Dédicaces

À ceux qui ont toujours cru en moi :

À ma mère, Rahimaha Allah ,tu nous as quittés alors que je n'avais qu'un an et je n'ai pas eu la chance de te connaître. Pourtant, ton absence a marqué chaque étape de ma vie et ton souvenir est toujours resté vivant dans mon cœur. J'aurais tant aimé te voir à mes côtés aujourd'hui et partager avec toi ce moment important.

Je dédie ce travail à ta mémoire, avec tout mon amour et ma profonde affection. Qu'Allah t'accorde Sa miséricorde et t'accueille dans Son vaste Paradis.

À mon père, pour ton amour, tes sacrifices et ton soutien sans faille qui ont toujours été ma plus grande force. Grâce à toi, j'ai appris la persévérance et la valeur du travail, et c'est avec fierté et émotion que j'arrive aujourd'hui à ce résultat.

Aucun mot ne peut exprimer toute ma gratitude ni la profondeur de mon respect. Ce travail est le reflet de tout ce que tu m'as transmis et de l'amour immense que je te porte.

À mon frère Moumen, en témoignage de mon amour, de mon respect et de ma gratitude pour ton soutien constant et ta présence à mes côtés dans les moments difficiles comme dans les moments de joie. Merci d'avoir toujours cru en moi et de m'avoir encouragé à avancer. Ce travail est aussi le tien.

À mes grands-mères,

à ma grand-mère décédée (Ma Alia), qu'Allah lui fasse miséricorde et lui accorde le plus haut degré du Paradis. Ton souvenir restera toujours vivant dans mon cœur, et je prie pour toi à chaque instant.

Et à ma grand-mère (Mima Rokia), merci pour ton amour, ta tendresse et tes prières. Tu es une source de bénédiction et de réconfort dans ma vie.

Je vous dédie ce travail avec tout mon amour, ma gratitude et mon respect.

À la femme de mon père et à ma sœur Zineb, à vous qui avez toujours été présentes avec amour, soutien et bienveillance, je dédie ce travail en signe de reconnaissance et d'affection. Votre présence a été une véritable force dans mon parcours**.**

À mes cousines, en témoignage de mon affection et de notre belle relation familiale. Merci pour votre présence, votre soutien et les bons moments partagés**.**

À mes amies ,Tima, Bouchra, Nada ,Noura et Hadile, en témoignage de notre amitié sincère et des beaux moments partagés tout au long de notre parcours. Merci pour votre soutien, votre présence et les souvenirs que nous avons construits ensemble**.**

Résumée :

Ce mémoire traite l'optimisation énergétique d'une station de pompage intégrée à une unité de dessalement d'eau de mer située à Mostaganem. L'objectif principal est d'améliorer les performances du système en intégrant un variateur de fréquence (VFD) et une régulation PID.

L'étude commence par une analyse du procédé de dessalement et des systèmes de pompage, suivie du calcul des principaux paramètres hydrauliques tels que la HMT, les pertes de charge et la consommation énergétique. Les résultats montrent que l'utilisation du VFD permet d'adapter la vitesse du moteur aux besoins réels du réseau, entraînant une réduction significative de la consommation électrique. En parallèle, la régulation PID assure une stabilité de la pression et une meilleure précision de fonctionnement. L'association VFD–PID améliore ainsi le rendement global de la station, réduit les pertes énergétiques et garantit un fonctionnement plus fiable et économique.

Mots-clés : station de pompage, VFD, PID, efficacité énergétique, HMT, dessalement.

---ooOoo----

ملخص :

تتناول هذه المذكرة موضوع تحسين الأداء الطاقوي لمحطة ضخ مدمجة ضمن وحدة تحلية مياه البحر بمدينة مستغانم. الهدف الرئيسي هو رفع كفاءة النظام من خلال إدماج مغير السرعة ومنظم تناسبي تكاملي تفاضلي

والفوائد تبدأ الدراسة بتحليل عملية التحلية ونظام الضخ، ثم حساب أهم المعاملات الهيدروليكية مثل الارتفاع المانومتري الطاقوية والاستهلاك الكهربائي. أظهرت النتائج أن استخدام مغير السرعة يسمح بتكييف الارتفاع المانومتري الكلي للمحرك مع حاجيات الشبكة الفعلية، مما يؤدي إلى تقليص مهم في استهلاك الطاقة الكهربائية.

يؤدي الجمع بين تقنيتي إلى ضمان استقرار الضغط ودقة التحكم في النظام، كما يساهم في تحسين المردود الكلي للمحطة، وتقليل الفواقد الطاقوية، وضمان تشغيل أكثر استقراراً وفعالية من حيث التكلفة .

الكلمات المفتاحية: تحلية مياه البحر ، ، الكفاءة الطاقوية، التحكم، محطة ضخ، مغير السرعة

---ooOoo----

Abstract :

The project can be further developed by transforming the pumping station into an intelligent system using modern technologies such as Digital Twin for real-time virtual simulation and monitoring of the system. Artificial Intelligence can also be integrated to improve demand prediction and enable automatic optimization of pump operation. In addition, PID controller performance can be enhanced through Auto-tuning algorithms to improve accuracy and dynamic response. Furthermore, IoT and SCADA technologies can be implemented to allow remote monitoring and control of the system. These improvements would make the pumping station more efficient, flexible, and adaptive to varying operating conditions

Table des matières

- **Remerciements**
- **Dédicaces**
- **Résumé**
- **Sommaire**
- **Liste des figures**
- **Liste des tableaux**
- **Identification des variables utilisée dans l'étude**

Introduction générale……...1

Chapitre 1 :Présentation de l'entreprise

1.1 Introduction 2

1.2 Historique du dessalement en Algérie 2

1.3 Description de la station de Mostaganem 2

1.2 Localisation géographique du site 3

1.4 Présentation du site de Mostaganem 4

1.5 Organisation technique du site 10

1.6 Organisation et services principaux 10

Chapitre II :Généralités sur les systèmes de pompage

II.1.1 Définition d'une station de pompage 14

II.1.2 Les composants d'un station de pompage 14

II.2 Types des pompes (centrifuges) 19

II.3.1 Courbes caractéristiques (H-Q) : 22

II.5.1 Le rendement 23

II.5.2 Les pertes énergétique **:**..... 24

II.6 Notion d'efficacité énergétique **..... 25**

II.6.1 Type de l'énergie dans station de pompage 25

II .6.2.1 L'efficacité énergétique :..... 26

II.6.2.2 Importance de l'efficacité énergétique 26

II.6.3 Indicateurs énergétiques aux systèmes de pompage 26

II.6.4 Facteurs influençant l'efficacité énergétique 27

II.6.5 Consommation énergétique des systèmes de pompage industriels 27

II.6.7 Maintenannce et gestion énergétique des installations industrielles 27

II.6.8.1 Utilisation des systèmes de contrôle pour améliorer l'efficacité énergétique : 28

II.6.8.2 Composants des systèmes de contrôle 28
II.6.8.3 Types de système de contrôle 29
II.6.9 Application de l'efficacité énergétique dans les systèmes de pompage 29
II.6.10 Bilan énergétique d'une station de pompage 29

Chapitre III :Intégration des technologies VFD et PID dans les station de pompage

III .1 Introduction ……31
III.2 Les variateurs de fréquence 32
III.2.1 Les composants d'un variateur de fréquence 32
III.1.2 Fonctionnement de variateur de fréquence 33
III.1.3 Méthodes de contrôle du variateur 34
III.1.4 l'importance du variateur de fréquence dans stations de pompage 34
III.1.5 Comment choisir le variateur de fréquence 35
III.1.6 les principales caractéristiques de la série de pompes à entraînement à fréquence variable KUVO KV90M 36
III.1.7 Optimisation du rendement des pompes par variateur de fréquence (VFD) 37
III .1.8 Lois d'affinité des pompes 38
III.2.1 Boucle de de contrôle PID 39
III.2.2 Fonction de transfert des 3 actions 40
III.2.3 Principales architectures de contrôle 40
3.2.4 Réglage et performance des PID 41
III .3 Intégration du VFD et PID dans une station de pompage hydraulique 42
III .4 Quels dispositifs de rétroaction sont utilisés avec la régulation PID **?** 43
III .5 L'importance d'utilisation la régulation PID 45
III .6 Application du VFD et PID dans une station de pompage 45
III .6.9 Les calculs 49
III .6.9.1 calculer la vitesse d'eau 50
III .6.9.2 Calcul de hauteur manométrique totale (HMT) 51
III .6.9.3 Calcule de Hp (pression réseau) 51
III .6.9.4 Calculs des pertes de charge 51
III .6.9.5 La vérification du point de fonctionnement 52
III .6.9.6 Calcul temps de fonctionnement 52
III .6.9.7 Calcul de la puissance hydraulique 52

III .6.9.8 Calcul de la puissance électrique absorbée 52
III .6.9.9 Consommation énergétique sans VFD 53
A.Partie VFD : 53
III .6.9.10 Calcul de nouvelle fréquence avec le VFD 53
III .6.9.11 Calcul de nouvelle puissance après variation de fréquence 53
III .6.9.12 Calcul de nouvelle débit après VFD 53
III .6.9.13 Calcul temps de fonctionnement 53
III .6.9.14 Calcul consommation d'énergie avec VFD 53
III .6.9.15 Gain énergétique (économie d'énergie) 54
III .6.9.16 Pourcentage économie d'énergie 54
III .6.9.17 La vitesse avec VFD 54
B.Partie PID : 54
III .6.9.18 Calcul erreur 54
III .6.10 Analyse des résultats 55
III .7 La réponse du système et régulation de pression 55
III .8 Schéma câblage **……55**

Chapitre IV : Résultats et essaies

IV .1 Introduction **:** 57
IV .2 TIA PORTAL (Totally Integrated Automation Portal) 57
IV .3 Notre programme 58
IV .3.1 Création du projet dans TIA Portal V17 58
IV .3.2 Configuration et paramétrage du matériel 58
IV .3.3 Blocs de programme (Le bloc main OB1) 60
IV .4 Supervision 64
IV .5 CONCLUSION : 68
Conclusion Générale 71
Références bibliographiques……..72
Annexe……76

Liste des figures :

Chapitre 1 :

Figure I.1: Station de dessalement de l'eau de mer Unité de Mostaganem ……3

Figure I.2 : Localisation de l'usine de dessalement……3

Figure I.3 Schéma général de dessalement de l'eau de mer……4

Figure I.4 : Système de pompage de l'eau de mer……...5

Figure I.5:- les filtres ……..6

Figure I-6: Osmose inverse (unité de MOSTAGANEM)……7

Figure I-7: Osmose et Osmose inverse**…**……7

Figure I-8 : Les membranes……8

Figure I .9 : Les étapes du dessalement de l'eau **…**……9

Figure I .10 : Supervision et automatisation d'une station de pompage via SACDA WinCC et PID……10

Figure 11 : Armoire de commande et de puissance avec variateurs de fréquence **……11**

Chapitre II :

Figure II .1: Les composants de moteur asynchrone 15

Figure II . 2: Réseau de tuyauteries industrielles **..... 15**

Figure II . 3 : Boucle de régulation PID..... 16

Figure II . 4 : Les déférents types des vannes 17

Figure II .5 : schéma de principe d'une turbine 17

Figure II .6 : Vue en coupe d'une turbine industrielle 17

Figure II . 7 : Compresseur d'aire de la station de pompage **..... 18**

Figure II . 8 : Classification des pompes hydraulique 20

Figure II .9 : Les types des pompes dynamique **..... 21**

Figure II .10 : La courbe caractéristique d'une pompe..... 22

Figure II .11: Point de fonctionnement de la pompe **..... 23**

Figure II .12: Bilan énergétique d'une station de pompage 30

Chapitre III :

Figure III .1 : station de pompage commandée par VFD et PID **..... 31**

Figure III .2 : Installation des variateurs de fréquence 32

Figure III . 3 : schéma de principe d'un VFD..... 33

Figure III .4 :étape de conversion d'énergie dans un VFD..... 34

Figure III .5 : schéma bloc dune boucle de régulation fermée 40
Figure III .6 : Dispositif de PID..... 42
Figure III .7 : schéma de câblage de régulation de pression..... 43
Figure III .8 : Réservoir au sol..... 48
Figure III .9 :Réservoir cylindrique 48
Figure III .10 : Installation de tuyauterie industrielle acier avec pompe centrifuge..... 48
Figure III .13 : Schéma électrique de la station de…….56

Chapitre IV :

Figure IV.1:logiciel de programmation TIA PORTAL V17. .....
Figure IV.2: création du projet. .....
Figure IV. 3 : Choix de l'API**.** .....
Figure IV.4: La configuration de l'API**.** .....
Figure IV.5:PLC tags..... 60
Figure IV.6: Bloc PID_Compact 61
Figure IV.7 : Normalisation de la pression brute .....
Figure IV.8: Conversion de la valeur normalisée en pression réelle..... 62
Figure IV.9: Mise à l'échelle de la sortie PID vers le variateur.....
Figure IV.10: Démarrage/Arrêt pompe .....
Figure IV.11: Commande de la sortie de la pompe .....
Figure IV. 12: Choix de l'écran de supervision.....
Figure IV.13 : Configuration matérielle SCADA. .....
Figure IV.14 : Table de variables stand.....
Figure IV.15 : Vue de station de dessalement.....
Figure IV.16 : Simulateur PLCSIM.....
Figure IV.18: La liaison de PLCSIM avec le CPU 67
Figure IV.19 : courbe de réponse du régulateur PID sous TIA PORTAL .....

Liste des tableaux

Tableau III .1 : Formules des lois affinité 38

Tableau III.2 : Influence des paramètres de PID sur le système …….....40

Tableau III .3 : Les dimensionnement de la tuyauterie DN…….47

Tableau III.4 : Analyse des résultats.....55

Tableau IV.1 : Caractéristiques techniques du CPU……..59

❖ **Identification des variables utilisée dans l'étude :**

Symbol	Grandeur	Unité
Q	Débit	m^3/s
A	Section	m^2
v	Vitesse	m /s
Di	Diamètre intérieur de tuyauterie	mm
Hp	Pression réseau	mCE
Hg	La hauteur géométrique	m
h_f	Pert de charge	m
t	Temps de fonctionnement	H
Ph	Puissance hydraulique	KW
ρ	La masse volumique	Kg /m^3
g	L'accélération de pesanteur	m/s^2
Pe	Puissance électrique	KW
η	Rendement de la pompe	%
E	Énergie consommée	KWh
N	Fréquence	Hz
$e\ (t)$	L'erreur	--
SP	Pression de consignee	bar
PV	Pression mesurée	bar

---ooOoo---- Introduction générale ---ooOoo----

L'eau constitue une ressource indispensable au développement économique, industriel et social. Face à l'augmentation de la demande en eau potable et aux contraintes liées aux ressources hydriques, le dessalement de l'eau de mer s'impose comme une solution stratégique pour de nombreux pays, notamment l'Algérie. Cependant, les usines de dessalement et les stations de pompage associées sont caractérisées par une forte consommation énergétique, ce qui représente un défi majeur sur les plans économique et environnemental.

Dans ce contexte, l'amélioration de l'efficacité énergétique des systèmes de pompage est devenue une priorité. Les avancées technologiques dans le domaine de l'automatisation industrielle offrent aujourd'hui des solutions performantes permettant d'optimiser le fonctionnement des équipements tout en réduisant leur consommation d'énergie. Parmi ces solutions figurent les variateurs de fréquence (VFD), qui permettent d'adapter la vitesse des moteurs aux besoins réels du procédé, ainsi que les régulateurs PID, largement utilisés pour assurer un contrôle précis et stable des paramètres de fonctionnement.

Le présent travail s'intéresse à la modernisation d'une station de pompage hydraulique intégrée à une unité de dessalement d'eau de mer située à Mostaganem. L'objectif principal est d'étudier l'impact de l'intégration des technologies VFD et PID sur les performances énergétiques et opérationnelles de la station.

Pour atteindre cet objectif, une étude du procédé de dessalement et des systèmes de pompage a été réalisée, suivie d'une analyse des paramètres hydrauliques et énergétiques. Une solution de contrôle basée sur un variateur de fréquence et une régulation PID a ensuite été proposée et simulée à l'aide des outils d'automatisation industrielle, notamment TIA Portal. Les résultats obtenus permettent d'évaluer les gains énergétiques réalisés ainsi que l'amélioration de la stabilité et de la fiabilité du système.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres. Le premier présente l'entreprise d'accueil et le procédé de dessalement de l'eau de mer. Le deuxième expose les généralités sur les systèmes de pompage et l'efficacité énergétique. Le troisième traite de l'intégration des technologies VFD et PID dans les stations de pompage ainsi que des calculs de dimensionnement. Enfin, le quatrième chapitre présente la programmation, la supervision et l'analyse des résultats obtenus.

Chapitre 1 :

Présentation de l'entreprise

1.1Introduction :

Le dessalement, également connu sous le nom de dessalage, est un procédé essentiel permettant de séparer les sels de l'eau brute, qu'il s'agisse d'eau de mer ou d'eau saumâtre d'origine continentale. Cette méthode vise principalement à éliminer le chlorure de sodium de l'eau de mer. Face aux pénuries d'eau croissantes [1].

L'Algérie dispose actuellement d'environ 24 usines de dessalement d'eau de mer réparties le long du littoral afin de renforcer l'alimentation en eau potable et de faire face au stress hydrique. Ces installations jouent un rôle stratégique dans la sécurisation des ressources en eau, particulièrement dans les grandes villes côtières. Grâce aux programmes récents de modernisation et d'extension, le pays a lancé plusieurs nouvelles stations de grande capacité dans différentes wilayas telles que Oran, Tipaza, Béjaïa et El Tarf. Le dessalement représente aujourd'hui une part importante de la production nationale d'eau potable, avec près de 42 % des besoins couverts par cette technologie. Cette orientation confirme la volonté de l'Algérie d'intégrer des solutions modernes et durables pour assurer la gestion efficace des ressources hydriques face à l'augmentation de la demande en eau et aux changements climatiques .

1.2Historique du dessalement en Algérie :

Depuis son indépendance, l'Algérie a déployé des efforts importants pour améliorer ses

ressources hydriques et la disponibilité de l'eau pour satisfaire ses secteurs économiques.

Les efforts de l'Algérie indépendante se sont focalisés, les premières années, sur la rénovation du réseau de distribution existant, la construction de barrage et l'exploitation des nappes phréatiques à un moment où l'option du dessalement n'est encore qu'à ses premiers pas.

L'expérience de l'Algérie en matière de dessalement se limite à la réalisation d'unités de

déminéralisation des eaux souterraines à très fort taux de salinité, pour des besoins liés à

l'industrie pétrolière et la sidérurgie seulement (Exemple de l'unité de déminéralisation de Oulad Djallal dans la Wilaya de Biskra) [2].

En 1964, trois petites unités de 8 m3/j chacune a été installées dans le complexe de gaz liquéfié d'Arzew. Le procédé utilisé est "à tubes submergés" travaillant à basse pression.

En 1969 d'une unité monobloc de 4 560 m3/j a vu le jour à Arzew. Le procédé utilisé est le multi stage flash – MSF. D'autres installations ont été mises en exploitation pour les besoins en eau de haute pureté, employée dans des complexes de production d'électricité (Cap Djinet à l'est d'Alger) et l'industrie de liquéfaction (Arzew et Skikda).

En 1980, a été inaugurée l'unité de dessalement par osmose inverse à Mostaganem d'une capacité de 57 600 m3/j, classée alors comme la plus importante au monde.

1.3 Description de la station de Mostaganem :

L'Usine de Dessalement de Mostaganem, située à la plage de Chéliff. L'usine a une capacité de production de 200 000 m³/jour d'eau potable, est conçue pour fournir l'eau potable

satisfaisant les exigences de qualité conformément aux prescriptions exigées et enfin avoir une consommation spécifique d'énergie électrique inferieure à la consommation spécifique d'énergie électrique garantie (3.40 kWh/m3). GS INIMA et AQUALIA sont des sociétés espagnoles spécialisées dans des activités associées au traitement de l'eau avancée. En partenariat avec l'Union Temporaire des Entreprises Opération &Maintenance Mostaganem UTE O&M MTM, ils ont créé une station de dessalement des eaux en 2005 qui se trouve à Sonactar dans la ville de Mostaganem. Son exploitation fut en 2010. [1]



Figure I.1: Station de dessalement de l'eau de mer Unité de Mostaganem

1.2 Localisation géographique du site :

L'Usine de Dessalement de Mostaganem est située à la Plage de Chéliff, dans la wilaya de Mostaganem, au nord-ouest de l'Algérie.

Elle est implantée en zone côtière, ce qui facilite le captage direct de l'eau de mer nécessaire au procédé de dessalement par osmose inverse.

Zone : Littoral – Plage de Chéliff / Proximité : Bordure de la mer Méditerranée



Figure I.2 : Localisation de l'usine de dessalement

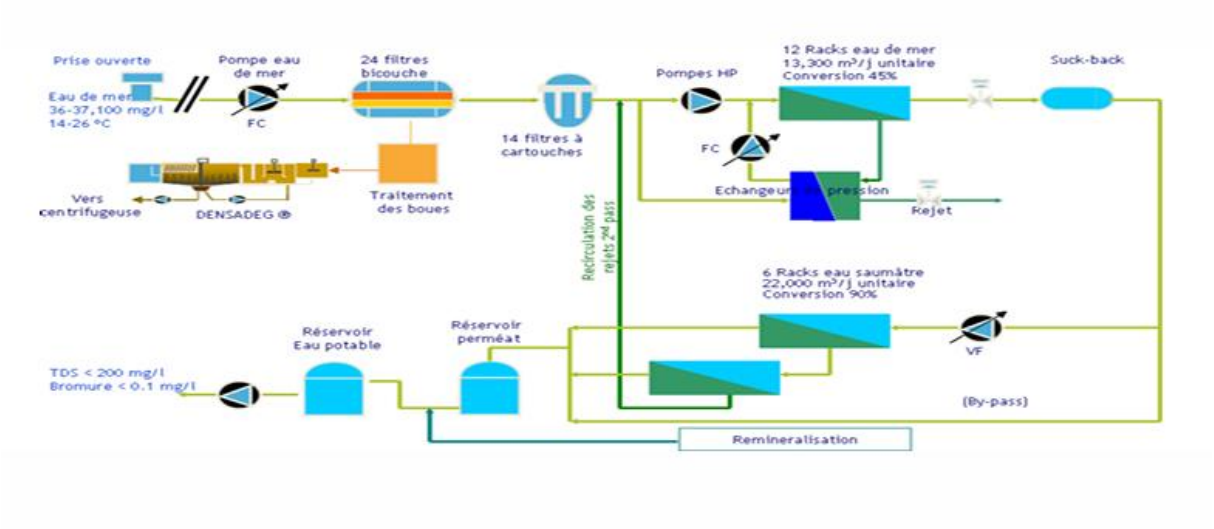


Figure I.3 Schéma général de dessalement de l'eau de mer

1.4 Présentation du site de Mostaganem :

Le projet de station de dessalement d'eau de mer de Mostaganem fait partie du large programme de construction d'usines de dessalement entrepris par le gouvernement algérien pour fournir à l'Algérie une ressource en eau potable et permettre à la nappe phréatique de se renouveler. Le procédé de traitement d'eau de cette station comprend :

1.4.1 Système de captage et pompage d'eau de mer :

Le captage de l'eau de mer se fait a travers de deux tours de prise connectées au réservoir de pompage d'eau de mer par deux tuyauteries en polyéthylène d'haute densité de 1.800 mm de diamètre ou l'eau doit circuler à une vitesse d'environ 1 m/s. Les tours de prise sont submergées à une distance de la cote d'environs 2500m et 16,5m de profondeur. L'aspiration des pompes d'eau de mer sera normalement plus haute que le niveau d'eau du réservoir de captage. Le système d'amorçage des pompes d'eau de mer a pour objet extraire l'air des conductions d'aspiration des pompes d'eau de mer. Le système pour amorçage des pompes d'eau de mer composé de deux groupes à vide équipés avec deux pompes de 4kw chaque un. Le démarrage et l'arrêt des pompes sont commandés par un détecteur du vide installé dans le réservoir du groupe. Le détecteur du vide placé dans le linge de raccordement aux pompes de captage fait un signal d'amorçage des pompes nécessaires pour son démarrage. Normalement le système d'amorçage sera à l'arrêt et les vannes seront fermées. Le système ne peut pas amorcer qu'une pompe à la fois. Le système de pompage d'eau de mer a pour objet fournir au prétraitement de l'eau de mer en quantité et à la pression nécessaire pour produire la quantité d'eau potable désirée. Les pompes de captage de l'eau de mer ont été conçues pour pomper un débit de 2380m3/h à une pression de 67 bars. Néanmoins ces pompes sont équipées avec des variateurs de fréquence pour permettre le changement du point de travail pour maintenir une pression au niveau de l'aspiration des pompes d'haute pression. L'aspiration des pompes de haute pression préalable à l'osmose est maintenue à une pression de 2.5 bars grâce à des échangeurs de fréquence. Dans le procès d'impulsion des pompes sont placées des vannes de retenue et vannes de papillon motorisées, d'entre elles deux unités pour les pompes de secours

et raccordées à chaque une de linge de prétraitement. Les pompes de secours et raccordées à chaque une de linge de prétraitement .



Figure I.4 : Système de pompage de l'eau de mer

1.4.2 Système de prétraitement :

Le Système de prétraitement comprend 3 sous-systèmes à savoir un sous-système de conditionnement chimique, un sous-système de filtration, un sous-système de microfiltration.

a) **Conditionnement chimique :**

Le conditionnement de l'eau est réussi par l'ajout des suivants réactifs :

- Dosage d'hypochlorite de sodium.
- Dosage de permanganate de potassium .
- Dosage d'acide sulfurique.
- Dosage de coagulant chlorure ferrique.
- Dosage de poly électrolyte.
- Dosage de soude caustique.
- Dosage de méta bisulfite de sodium.
- Dosage de dispersant .

b) Sous système de filtration :

La fonction du sous système de filtration est d'éliminer les flocons formés par les systèmes de coagulation-floculation et les particules en suspension de l'eau de mer pour protéger et améliorer la performance du système d'osmose inverse. L'anthracite est une seconde étape avec des filtres à sable (figure2). Pour optimiser la durabilité des membranes d'osmose et des cartouches des micro-filtres, il est recommandé de vérifier la SDI en aval du système de filtration et en amont du système de microfiltration. Si la valeur de SDI recommandée est atteinte à la sortie de la première étape de filtration, la deuxième pourra être by passé .[1]



Figure I.5:- les filtres

L'usine est équipée de deux lignes de filtration de première étape comprenant chacune 12 filtres horizontaux sous pression fonctionnant à une vitesse normale de 8.45 m/h et maximale de 9.46 m/h lors du lavage d'un filtre. Chaque filtre possède une surface moyenne de 91,39 m². Le nettoyage se fait par air et saumure provenant du procédé d'osmose inverse afin d'assurer une distribution homogène de l'eau et de l'air de nettoyage. Les filtres sont commandés par des vannes papillon pour contrôler l'entrée et la sortie de l'eau de mer et de la saumure. Ce système permet d'améliorer l'efficacité de filtration et de protéger les équipements de l'installation.[2]

La deuxième étape de filtration est composée de deux batteries contenant chacune huit filtres horizontaux sous pression fonctionnant à une vitesse de 12.87 m/h et pouvant atteindre 15.09 m/h pendant le nettoyage. Chaque filtre possède une surface filtrante moyenne de 90.04 m² et présente les mêmes caractéristiques que les filtres de la première étape. Le sable utilisé est constitué de grains propres, sans argile, poussière, matières organiques, fer ni manganèse afin de préserver la qualité de l'eau filtrée.[2]

c) Système de microfiltration

La fonction du système de microfiltration est de protéger le système d'osmose inverse empêchant ainsi le pompage à haute pression. La microfiltration ne permette de passer que des particules de taille inférieure à 5 microns. Le système de microfiltration consiste à deux lignes équipées avec neuf (9) filtre chacune. Chaque filtre est muni 360 cartouches de 1250 mm de longueur. Le débit unitaire par cartouche est de 2,85m3/h, lorsque les neuf seront en activité il atteindra celui de 3,2 m3/h. Les cartouches sont logées dans une carcasse en PREV. Les cartouches sont fabriqués en polypropylène de 1250 mm de longueur .[2]

1.4.3 Système osmose inverse :

Le système d'osmose inverse (figure 6) est le cœur de l'usine et sa fonction est de réduire la teneur en sels de l'eau micro-filtrée. Il comprend le système de nettoyage de membrane, le système de pompage haut pression et de récupération d'énergie et le châssis d'osmose inverse.



Figure I-6: Osmose inverse (unité de MOSTAGANEM)

L'Osmose inverse est un procédé de purification de l'eau inspiré du phénomène chimique appelé l'Osmose. Pour mettre en place le principe de l'Osmose, on sépare 2 solutions aqueuses de concentrations différentes par une membrane semi-perméable qui ne laisse passer que l'eau pure. La solution dont la concentration est la plus basse va alors chercher à équilibrer les concentrations des 2 solutions en faisant passer de l'eau pure (H2O) dans le compartiment de la solution dont la concentration est la plus élevée

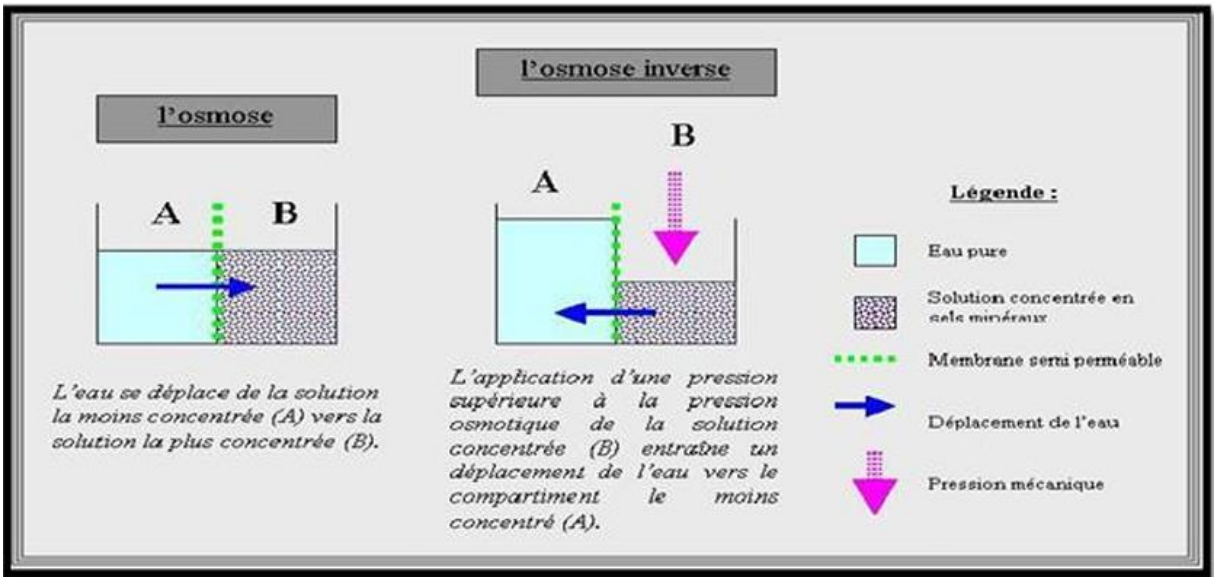


Figure I-7:Osmose et Osmose inverse

Pour diminuer les surfaces nécessaires à l'implantation des membranes, celle-ci sont configurées en spirale, comme l'indique (la figure 8). Cette configuration permet d'augmenter la surface de filtration tout en diminuant l'encombrement des modules membranaires. Les zones de circulation de l'eau d'alimentation ainsi que les circuits de récupération du perméat sont aménagés à l'aide de grilles intercalées entre les membranes. L'ensemble est ensuite enroulé autour d'un tube collecteur central afin de former des éléments membranaires de dimensions standardisées par osmose inverse .



Figure I-8 : Les membranes

1.4.4 Système de reminéralisation et conditionnement :

A la fin du processus d'osmose inverse l'eau osmotique est reminéralisée pour diminuer l'agressivité de l'eau et atteindre les valeurs d'alcalinité, dureté, pH, indice de lange lié et MTD garanties. L'eau osmotique de chaque ligne d'osmose inverse est conduite vers le ré minéralisation à travers de collecteurs indépendant. Chaque collecteur transporte le débit de chaque ligne de production, soit : 100.000m3 /jours. L'eau est stockée dans un réservoir de 6 m de hauteur, à un chaque cota suffisant pour permettre le passage de l'eau osmotique à travers les lits à calcite par l'effet de la gravité et atteindre ainsi le réservoir de stockage de l'eau produite. Ce réservoir est divisé en deux de manière que les lignes de production restent dépendantes jusqu'à l'entrée du réservoir d'eau potable. Le système de ré minéralisation est constitué de deux ensembles de lits de calcite (chacun est composé par 30 cellules de 14 m² de surface) et d'un processus de dosage de dioxyde de carbone. Dans la tuyauterie de raccordement du réservoir de l'eau osmotique avec le réservoir des couches à calcite se fait un dosage de CO2 à travers un séparer installé dans la même tuyauterie de raccordement. L'eau rentre par le bas des cellules et est distribuée au travers des faux fonds des lits de calcite. L'anhydride carbonique dissous dans l'eau, réagit avec le carbonate calcique du lit formant le bicarbonate calcique soluble, avec lequel le pH augmentera. Une fois passée la réaction de ré 22 minéralisation, on aura amélioré la dureté et l'alcalinité de l'eau, et il existera un résiduel de CO2 en équilibre avec HCO3 qui déterminera le pH de l'eau traitée .[1][5]

1.4.5 Système d'évacuation de la saumure et des sous-produits :

L'usine de dessalement dispose d'un système d'évacuation de la saumure et des sous-produits conçu pour assurer le rejet sécurisé des effluents issus du procédé de dessalement par osmose inverse. Après le traitement de l'eau de mer, une saumure fortement concentrée en sels dissous est produite, ainsi que certains résidus provenant des opérations de prétraitement et de nettoyage des installations. Cette saumure est collectée à travers un réseau de conduites et acheminée vers un système de rejet équipé de pompes, de vannes de régulation et de diffuseurs marins permettant une dispersion contrôlée en mer. Le système est conçu avec des

matériaux résistants à la corrosion afin de supporter la forte salinité et les conditions hydrauliques de fonctionnement. Par ailleurs, des mesures environnementales sont prises pour limiter l'impact des rejets sur le milieu marin, notamment par la dilution de la saumure avant son évacuation et le contrôle continu des paramètres de rejet conformément aux normes environnementales en vigueur.

1.4.6 Stockage et impulsion de l'eau produite :

Le système de stockage et d'impulsion de l'eau commercialisable a pour objet de pomper l'eau produite vers le réseau de distribution à travers le réseau de transport d'eau externe géré par Algérienne des Eaux. Le système de stockage et d'impulsion de l'eau produite est composé d'un réservoir d'eau reminéralisée, d'un système de pompage d'eau reminéralisée et d'un regard de livraison. Le réservoir d'eau reminéralisée possède une capacité de 4 000 m³ et est fabriqué en béton armé. Il est équipé de capteurs de niveau, d'interrupteurs de niveau ainsi que de transmetteurs de pH permettant la surveillance continue des paramètres d'exploitation.[1]

L'eau commercialisable est pompée vers le réseau de distribution par des pompes assurant un débit de 1 150 m³/h sous une hauteur manométrique de 51 MCE par pompe. Afin d'améliorer les performances du système et de réduire la consommation énergétique, les moteurs des pompes peuvent être commandés par des variateurs de vitesse (VFD) permettant d'ajuster automatiquement la vitesse de rotation selon les besoins du réseau. En complément, des régulateurs PID assurent le contrôle automatique du débit et de la pression afin de garantir un fonctionnement stable et continu du système de pompage. Le système comprend également un débitmètre, des transmetteurs de pH, un analyseur de chlore, un transmetteur de conductivité ainsi qu'un turbidimètre permettant le suivi de la qualité de l'eau produite.

1.4.7 Réseau de transport de l'eau externe :

Le réseau de transport d'eau externe assure l'acheminement de l'eau commercialisable impulsée par le système de pompage de l'usine de dessalement de Mostaganem. Il est composé d'une conduite de refoulement en fonte ductile de diamètre DN 1400 et d'une longueur de 693 m, ainsi que d'un réservoir intermédiaire d'une capacité de 2 000 m³ .[1]

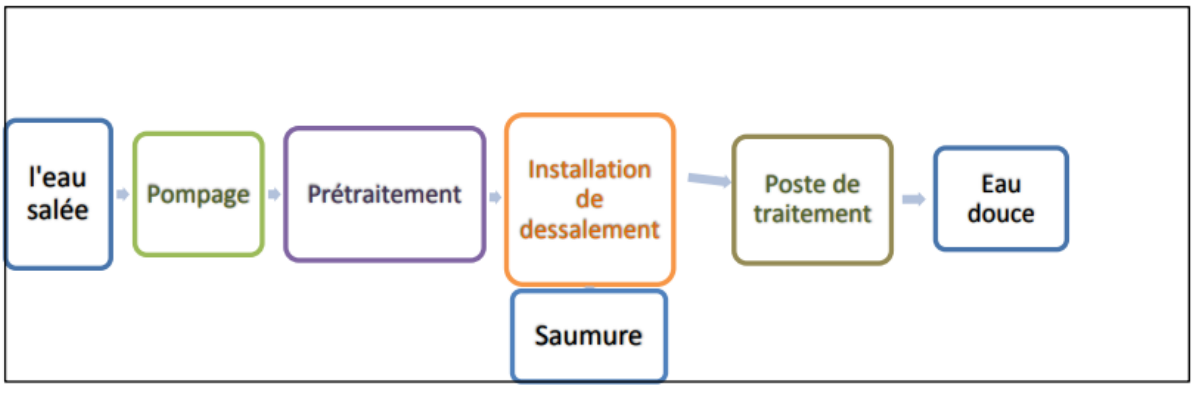


Figure I .9 Les étapes du dessalement de l'eau

1.5 Organisation technique du site

Sur le plan technique, l'usine est structurée en plusieurs sous-systèmes interconnectés :

- **Section Captage :**

-Pompes d'eau de mer

-Conduites d'aspiration

-Grilles de protection

- **Section Prétraitement :**

-Filtres

-Unités de microfiltration

-Systèmes de dosage chimique

- **Section Osmose Inverse :**

-Pompes haute pression

-Membranes d'osmose inverse

-Systèmes de récupération d'énergie

- **Section Post-traitement :**

-Bassins de reminéralisation

-Ajustement du pH

-Désinfection finale

- **Système de contrôle :**

-Capteurs (pression, débit, conductivité)

-Automates programmables

-Régulation PID

-Variateurs de vitesse (VFD)

-Cette organisation permet un fonctionnement automatisé et optimisé de l'installation

1.6 Organisation et services principaux :

L'organisation de Sonactar Mostaganem repose généralement sur plusieurs services techniques et administratifs, notamment :

- **Service Exploitation :**

Le service exploitation assure la conduite opérationnelle et la supervision continue des

procédés de dessalement par osmose inverse. Il contrôle les paramètres de fonctionnement tels que le débit, la pression, la température, la salinité et le rendement des membranes. Les opérateurs surveillent les équipements de captage, les pompes haute pression, les unités de prétraitement et les trains d'osmose inverse afin de garantir la continuité de production et la stabilité hydraulique de l'installation. Ce service participe également à l'optimisation énergétique et à la gestion des arrêts programmés.

- **Service Maintenance :**

Le service maintenance est chargé d'assurer la disponibilité, la fiabilité et la durée de vie des équipements industriels. Il réalise des opérations de maintenance préventive, prédictive et corrective sur les pompes centrifuges, moteurs électriques, variateurs de vitesse (VFD), vannes motorisées, échangeurs, membranes et systèmes hydrauliques. Ce service utilise des méthodes de diagnostic technique telles que l'analyse vibratoire, la thermographie et le contrôle des performances afin de réduire les temps d'arrêt et d'améliorer la sûreté de fonctionnement des installations.

- **Service Électrique et Automatisme :**

Le service électrique et automatisme assure la gestion des réseaux électriques industriels basse et moyenne tension ainsi que l'autorisation des procédés. Il supervise les automates programmables industriels (PLC), les interfaces SCADA/HMI, les capteurs de pression et de débit, les variateurs de fréquence (VFD) et les boucles de régulation PID. Son rôle est d'optimiser le contrôle des pompes et des équipements afin d'améliorer la stabilité du système hydraulique, de réduire la consommation énergétique et d'assurer la protection électrique des installation

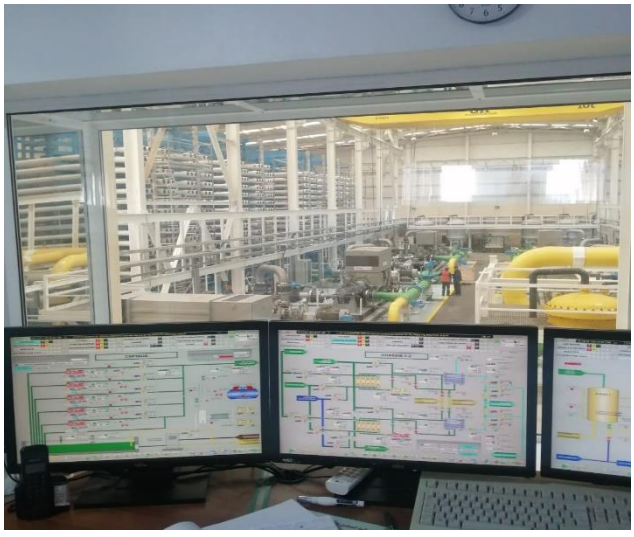


Figure 10 : Supervision et automatisation d'une station de pompage via SCADA WinCC et PID

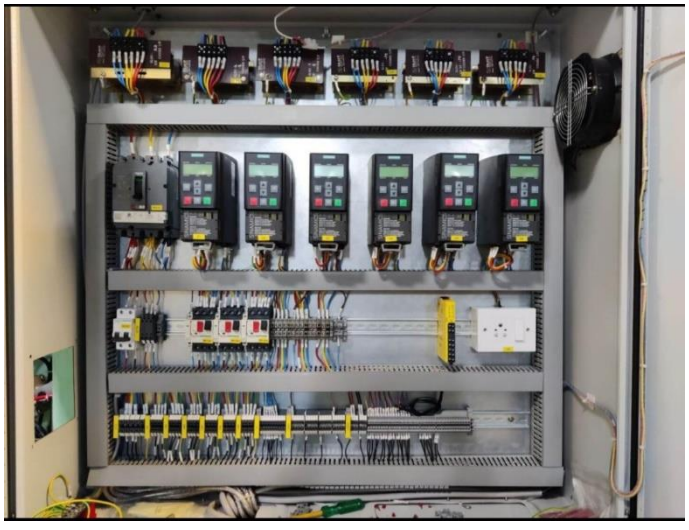


Figure 11 : Armoire de commande et de puissance avec Variateurs de fréquence

- **Service Laboratoire / Qualité :**

Le service laboratoire et qualité réalise le suivi analytique des paramètres physico-chimiques et microbiologiques de l'eau brute, de l'eau traitée et de l'eau produite. Il effectue des analyses telles que la conductivité, le pH, la turbidité, la salinité, le chlore résiduel et le taux de minéralisation. Ce service contrôle également les performances des membranes d'osmose inverse et vérifie la conformité de l'eau dessalée aux normes nationales et internationales relatives à l'eau potable.

- **Service HSE (Hygiène, Sécurité, Environnement) :**

Le service HSE veille à l'application des normes de sécurité industrielle, de protection environnementale et de prévention des risques professionnels. Il élabore les procédures de sécurité liées aux équipements sous pression, aux installations électriques et aux produits chimiques utilisés dans le traitement de l'eau. Ce service supervise également la gestion des rejets de saumure, le traitement des déchets industriels, les plans d'intervention d'urgence et la sensibilisation du personnel aux règles d'hygiène et de sécurité au sein de l'usine.

Chapitre II :
Généralités sur les systèmes de pompage

II.1.1 Définition d'une station de pompage :

Les stations de pompage sont des installations qui collectent les fluides principalement l'eau après leur extraction à partir de différentes profondeurs et sources, puis les distribuent vers différentes destinations à travers un réseau de canalisations. Elles servent aussi bien à l'alimentation en eau qu'à l'évacuation des eaux usées. Dans certains cas industriels, elles pompent d'autres fluides comme les huiles ou le pétrole, dont les caractéristiques (densité, viscosité) influencent le choix des équipements et le dimensionnement .[4]

II.1.2 Les composants d'une station de pompage :

A. Les pompes :

Les pompes constituent l'élément principal d'une station de pompage. Ce sont des dispositifs mécaniques qui aspirent des liquides (tels que les huiles, l'essence et les liquides alimentaires) à une pression déterminée, les transportent puis les refoulent à une pression finale plus élevée vers l'emplacement souhaité .Ainsi, les pompes sont considérées comme des générateurs de débit ou de puissance, transformant l'énergie mécanique qui les entraîne en énergie hydraulique. L'aspiration du liquide s'effectue par un orifice d'entrée et le refoulement par un orifice de sortie relié au reste du système. Les pompes doivent être conformes à la norme API 610.

B. Le moteur asynchrone :

Le Moteur asynchrone triphasé(figure1), souvent qualifié de « poumon de l'industrie », occupe une place prédominante dans les systèmes de production modernes. Grâce à sa simplicité de fabrication, sa robustesse et son coût relativement faible, il constitue le convertisseur d'énergie le plus utilisé dans de nombreuses applications industrielles, notamment dans les systèmes de pompage hydraulique. Dans une station de pompage, ce moteur entraîne généralement une pompe centrifuge afin de transformer l'énergie électrique en énergie mécanique de rotation, puis en énergie hydraulique permettant le déplacement du fluide. Son fonctionnement repose sur le principe de l'Induction électromagnétique . Le moteur asynchrone fonctionne grâce au champ magnétique tournant produit par le stator, qui est la partie fixe de la machine. Lorsque le stator est alimenté par un courant alternatif, il crée un champ magnétique tournant qui induit des courants dans le rotor, la partie mobile du moteur. L'interaction entre le champ magnétique du stator et celui créé dans le rotor produit un couple électromagnétique qui entraîne la rotation du rotor. On parle de moteur asynchrone parce que la vitesse du rotor est toujours légèrement inférieure à la vitesse du champ magnétique tournant, cette différence étant appelée glissement. La vitesse du champ tournant, appelée vitesse de synchronisme .[6] ;est donnée par la formule :

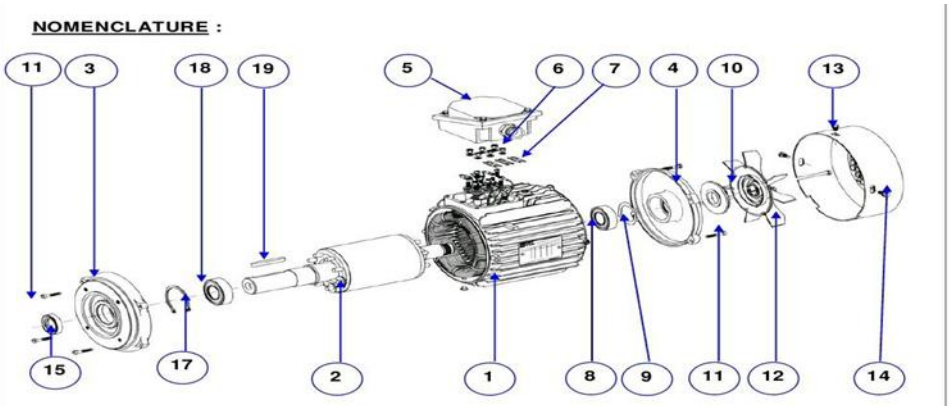
$$\underline{Ns=120\times f/P}$$

Ns= est la vitesse en tours par minute

f = la fréquence du courant en hertz

P = le nombre de pôles du moteur.





N°	Nom	N°	Nom	N°	Nom
1	Stator bobiné	8	Roulement arrière	15	Joint flasque avant
2	Rotor	9	Rondelle de précharge	16	Goupille fixation ventilateur
3	Flasque avant	10	Entretoise	17	Segment d'arrêt (circlips)
4	Flasque arrière	11	Vis fixation flasque	18	Roulement avant
5	Boite à bornes	12	Ventilateur	19	Clavette de bout d'arbre
6	Bornes	13	Capot de ventilation	20	Flasque de poulie avant
7	Barrettes de connexions	14	Vis de fixation capot	21	Flasque de poulie arrière

Figure 1:Les composants de moteur asynchrone

C .Les conduites (tuyauteries) :

Ce sont des tubes ou canalisations qui permettent de transporter le fluide (eau, liquide industriel, etc.) entre les différents équipements de la station (réservoirs, pompes, vannes, instruments de mesure) tout en assurant un débit régulier, une pression adaptée et la sécurité du système. Elles peuvent être en acier, PVC, fonte ou autres matériaux selon les besoins et la pression.



Figure 2: **Réseau de tuyauteries industrielles**

D . Les vanne :

La vanne est un dispositif mécanique permettant d'arrêter, de réguler ou de modifier le débit d'un fluide dans une conduite. Il existe plusieurs types de vannes utilisées dans les installations industrielles, chacune étant adaptée à une fonction spécifique :

➢ **Vanne d'arrêt :**

Une vanne d'arrêt est un organe de réseau utilisé pour ouvrir ou fermer complètement la section d'une conduite. Elle permet d'interrompre totalement l'écoulement d'un fluide dans une installation hydraulique . sont largement utilisées dans les stations de pompage, afin de contrôler l'alimentation en fluide et d'assurer la sécurité de l'installation.

➢ **Vanne anti-retour :**

Un clapet anti-retour est un dispositif installé sur une tuyauterie permettant de contrôler le sens de circulation d'un fluide quelconque. Le fluide (liquide, gaz, air comprimé, etc.) peut donc circuler dans un certain sens, mais son flux est bloqué si ce sens s'inverse .

➢ **Vanne de régulation :**

Une vanne de régulation modifie un débit fluide (grandeur réglant), en fonction du signal provenant d'un régulateur (signal de commande) ou d'un émetteur et ceci quelques soient les contraintes liées à la circulation du fluide.

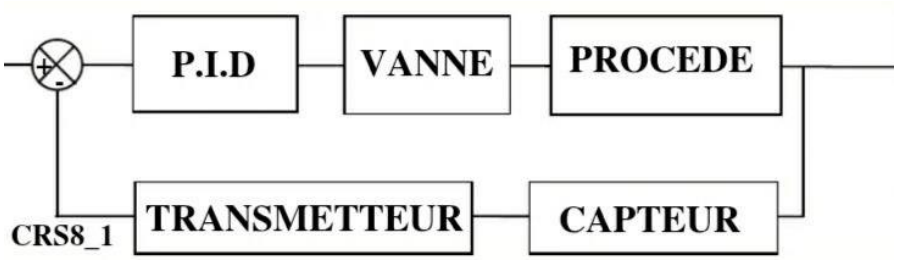


Figure 3 : Boucle de régulation PID

➢ **Vanne à une bille :**

Une vanne à bille est une vanne d'arrêt qui utilise une bille rotative avec un alésage pour contrôler le flux d'un liquide ou d'un gaz. La bille rotative est tournée d'un quart de tour (90°) autour de son axe pour permettre ou bloquer le flux à travers la vanne .Elle est particulièrement appréciée pour son étanchéité, sa rapidité de manœuvre et sa faible perte de charge.

➢ **Vanne à papillon :**

La vanne à papillon est couramment utilisée dans plusieurs secteurs industriels tels que les industries pour contrôler ou interrompre l'écoulement de différents fluides comme l'eau, l'air comprimé ou certains gaz. La partie la plus importante de la vanne est le disque de métal. Le papillon (disque) est monté sur une tige. Lorsque le clapet est fermé, il bloque le passage du fluide.



Figure 4 : Les déférents types des vannes

E . Turbine :

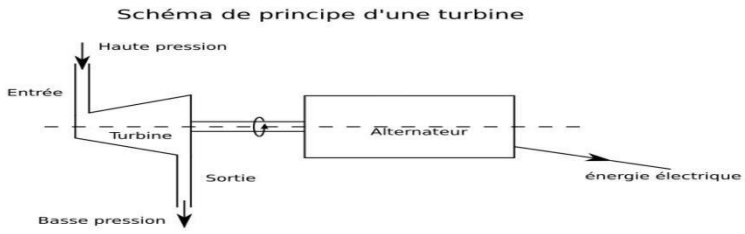


Figure 5 : schéma de principe d'une turbine

Une turbine est une machine qui convertit l'énergie d'un fluide en énergie mécanique pour entraîner une pompe, un générateur ou un autre équipement. Dans certaines stations de pompage, on utilise des turbines pour exploiter la pression ou l'énergie hydraulique d'un cours d'eau ou d'un réservoir afin de fournir l'énergie nécessaire au pompage. Le rôle dans la station de pompage est de donner l'énergie mécanique pour les pompes et de permettre un fonctionnement continu et stable et d'optimiser l'utilisation de l'énergie hydraulique disponible.

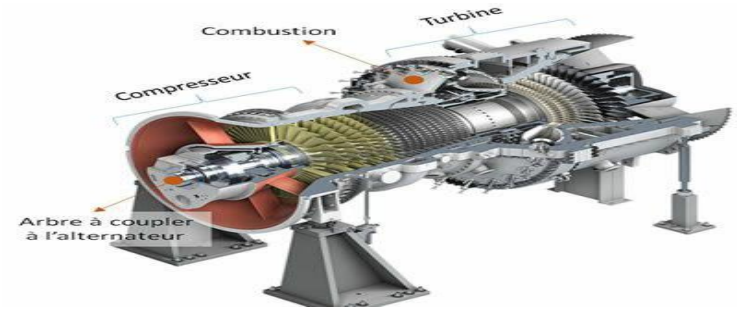


Figure 6 :Vue en coupe d'une turbine industrielle

F. Les compresseur :

Une station de pompage est équipée d'un compresseur qui permet de fournir de l'air sous pression pour diverses applications comme actionner pneumatiquement des vannes, pressuriser des réservoirs, ou encore nettoyer des tuyauteries.

Rôle des compresseurs dans les stations de pompage :

- Fournir de l'air sous pression aux systèmes pneumatiques
- Permettre l'automatisation des vannes et des dispositifs
- Assurer la sécurité et le contrôle des installations.



Figure 7 : Compresseur d'aire de la station de pompage

G. Les instruments de mesure :

Ce sont des dispositifs utilisés pour surveiller et contrôler les paramètres essentiels d'une station de pompage (pression , débit, niveau) afin d'assurer un fonctionnement sur et efficace des équipements ,de prévenir les anomalies et d'optimiser la consommation énergétique . Permi les instruments les plus utilisés on trouve :

- **Manomètre de pression :**

Le manomètre est un instrument utilisé pour mesurer la pression du fluide dans les conduites ou à la sortie de la pompe. Il permet aux opérateurs de vérifier si la pression du système est dans les limites normales de fonctionnement.

- **Le transmetteur de pression :**

est un capteur qui mesure la pression et la convertit en signal électrique (souvent 4-20 mA) transmis au système de contrôle. Ce signal permet la surveillance et la régulation automatique de la pression dans la station de pompage.

- **Débitmètre :**

Le débitmètre est un instrument qui sert à mesurer le débit du fluide circulant dans les conduites. Il permet de connaître la quantité d'eau transportée par la pompe dans une période

donnée. Les informations fournies par le débitmètre sont importantes pour contrôler la performance du système de pompage et optimiser la consommation énergétique.

- **Capteurs (niveau ou température) :**

Les capteurs sont des dispositifs utilisés pour détecter et mesurer différentes grandeurs physiques dans la station de pompage, comme le niveau d'eau dans un réservoir ou la température du système. Les données mesurées sont envoyées au système de contrôle afin d'assurer le bon fonctionnement et la sécurité des équipements.

  - Capteur de niveau à pression.
  - Capteur ultrasonique.
  - Capteur PT100 / thermocouple.

H. Les système de commande et contrôle :

Il permet de surveiller, réguler et automatiser le fonctionnement les d'une station de pompage, on trouve :

- **Automate programmable industriel (API / PLC) :**



L'automate programmable industriel est un dispositif électronique utilisé pour contrôler et automatiser le fonctionnement des équipements dans une station de pompage. Il reçoit les informations des capteurs et envoie des commandes aux pompes, aux vannes ou aux moteurs afin d'assurer un fonctionnement automatique et efficace du système.

- **Contacteurs électriques :**



Les contacteurs sont des dispositifs électromécaniques utilisés pour commander le démarrage et l'arrêt des moteurs électriques des pompes. Ils permettent de contrôler la puissance électrique envoyée au moteur.

- **Relais de protection :**



Les relais de protection sont des dispositifs destinés à protéger les moteurs et les équipements électriques contre les anomalies comme les surcharges, les courts-circuits ou les variations de tension.

- **Système de supervision (SCADA) :**

Le système de supervision est une plateforme informatique qui permet de surveiller et contrôler la station de pompage à distance. Il affiche les données de fonctionnement en temps réel, comme le débit, la pression, le niveau et la consommation énergétique.

II.2 Types de pompes (centrifuges) :

➢ Les pompes en général se partagent en trois grandes familles :

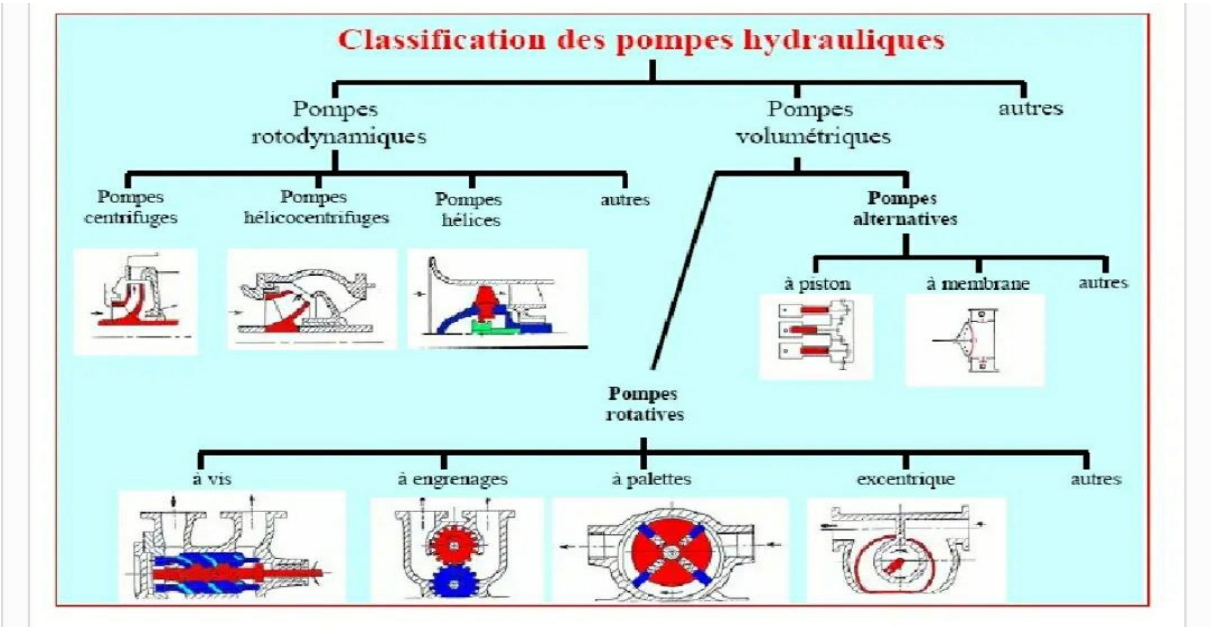


Figure 8 :Classification des pompes hydraulique

II.2.1 Les pompes volumétriques :

Le fonctionnement des pompes volumétriques repose sur la variation cyclique d'un volume hermétique. Un organe mobile (piston, rotor, membrane) modifie l'espace interne du corps de pompe, générant ainsi alternativement l'aspiration et le refoulement du fluide. Elles comprennent :

- **Pompes alternatives :**
  1. À piston
  2. À membrane.
- **Pompes rotatives :**
  1. À engrenages
  2. À vis
  3. À palettes
  4. À excentrique

Elles sont utilisées pour des liquides visqueux, des produit chimiques ou lorsque le dosage précis est nécessaire .

II.2.2 Pompes dynamique :

sont des pompes où la pression est créée par l'action des forces centrifuges ou par la conversion de l'énergie cinétique du fluide en pression. Le liquide circule dans un système ouvert, jamais enfermé dans un volume clos, ce qui permet d'atteindre des débits très élevés. Cette catégorie comprend les pompes centrifuges, hélico-centrifuges et à hélice.

Sous-types:

- ➢ Pompe centrifuge (la plus courante pour les stations de pompage)
- ➢ Pompe axiale
- ➢ Pompe mixte (hélico-centrifuge)

❖ Norme importante : API 610

❖ Utilisation : eau, hydrocarbures, irrigation, drainage

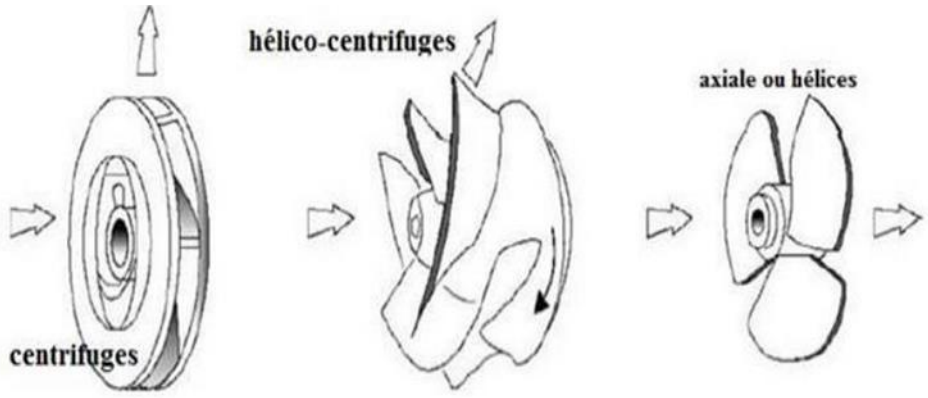


Figure 9 : Les types des pompes dynamique

II.2.3 Pompes spécifiques :

➢ Pompe submersible (immergée)

➢ Pompe doseuse (précision de débit)

➢ Pompe à vide

❖ Les pompes centrifuges :

Les pompes centrifuges (figure 9)sont les plus utilisées dans le domaine industriel à cause de la large gamme d'utilisation qu'elles peuvent couvrir, de leur simplicité et de leur faible coût. Elles utilisent la force centrifuge pour assurer la circulation des liquides. Leur fonctionnement se déroule généralement en trois étapes principales : l'aspiration, l'accélération et le refoulement. Lorsque le moteur entraîne la rotation du rotor, le liquide est aspiré par le centre de la pompe, appelé œil, puis sa vitesse augmente à l'intérieur de la roue. L'énergie mécanique fournie par l'arbre de la pompe est alors transformée en énergie cinétique. Ensuite, le liquide est projeté vers la volute, où sa vitesse diminue et son énergie cinétique se transforme en énergie de pression, ce qui permet son refoulement vers la conduite de sortie. Dans le but d'augmenter la hauteur de refoulement, plusieurs étages d'aubages peuvent être juxtaposés sur l'arbre, chaque étage transmet l'eau à l'étage suivant en élevant la pression jusqu'à l'étage final.

Pour éviter toute perte de remplissage lors du redémarrage, ces pompes doivent être remplies de liquide afin d'éliminer l'air on peut installer un clapet anti-retour à l'extrémité de la conduite d'aspiration.[5]

II.3.1 Courbes caractéristiques (H-Q) :

La courbe caractéristique d'une pompe centrifuge est un graphique (figure10) qui illustre la capacité de la pompe à déplacer un fluide en fonction de la pression à laquelle elle fonctionne. Elle met en relation deux variables principales :

Hauteur manométrique (H) : différence de pression entre la sortie et l'entrée de la pompe, exprimée en mètres.

Débit (Q) : quantité de fluide circulant à travers la pompe par unité de temps ,et peut

fournir, en m^3/h ou L/s.

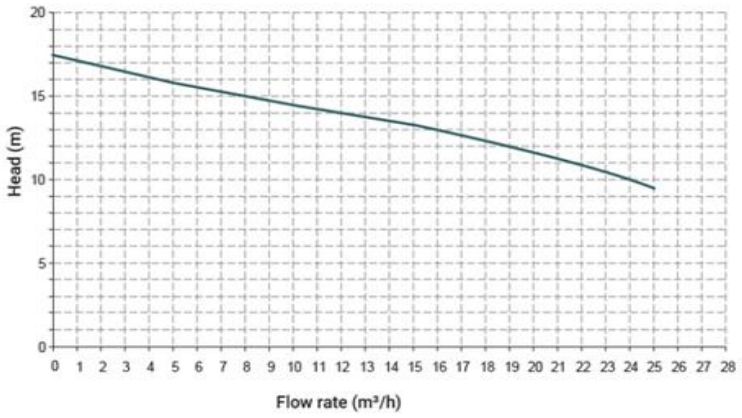


Figure 10 : La courbe caractéristique d'une pompe

- Cette courbe est essentielle pour le choix et le dimensionnement d'une pompe, car elle permet :

d'identifier le point de fonctionnement optimal (rendement maximal),de

connaître la capacité réelle de la pompe à répondre aux besoins du système dans lequel elle sera installée.[7]

II.3.2Relation hauteur manométrique (H) et débit (Q)

La relation H-Q pour une pompe centrifuge montre que la hauteur manométrique (H) diminue quand le débit (Q) augmente. À bas débit, la pompe peut atteindre sa hauteur maximale car les pertes dans le circuit restent faibles. Par contre, à débit élevé les frottements et les résistances dans les tuyaux et coudes et vannes réduisent la hauteur manométrique disponible. Le point où la courbe H-Q de la pompe croise celle de la résistance du système représente le point de fonctionnement réel. Cela détermine le débit et la hauteur fournis par la pompe. Cette relation inverse est clé pour dimensionner et choisir la pompe afin de garantir qu'elle répond bien aux besoins du réseau hydraulique. Et la relation n'est pas linéaire, elle est

décroissante. Elle est représentée par ce qu'on appelle la courbe caractéristique de la pompe.[7]

II.3.3 Point de fonctionnement de la pompe :

Le point de fonctionnement d'une pompe correspond au point d'intersection entre la courbe caractéristique de la pompe (H-Q) et la courbe du réseau hydraulique(figure 11). À cet endroit précis, la hauteur que la pompe donne est ce que le système demande. Donc, la pompe travaille dans des conditions stables. Le débit et la pression restent équilibrés. Ce point est crucial pour l'étude des systèmes de pompage. Il aide à savoir comment la pompe fonctionne vraiment et à évaluer ses performances dans le réseau hydraulique. Trouver correctement ce point améliore l'efficacité énergétique du système de pompage et aide à prévenir des problèmes de fonctionnement.

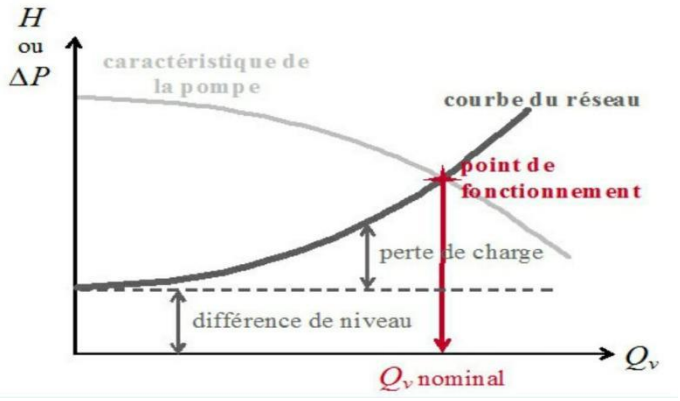


Figure 11: Point de fonctionnement de la pompe

II.4 .1 Puissance hydraulique :

$$P_h = q \times \rho \times g \times h$$

- P_h : la puissance hydraulique (W).
- q : le débit volumique (m^3/s).
- ρ : la masse volumique (kg/m^3).
- g : l'accélération de pesanteur (m/s^2).
- h : la hauteur géométrique (m).

II.5.1 Le rendement :

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

Les rendements maximaux sont de l'ordre de :

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

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

• 80 % pour les pompes de forte puissance

• 50 à 60 % pour les petites pompes.

- **Rendement globale :**

$$\eta g = Pu / Pa$$

- **Rendement mécanique :**

$$\eta mec = Pi / Pa$$

Pi: $Puissance\ interne = Pa - Pme$

$Pmec$: Puissance mécanique

- **Rendement par frottement interne :**

$$\eta fi = Pi - Pf / Pa$$

Pfi : puissance par frottement sur disque et sur cylindre

II.5.2 Les pertes énergétique :

Sont la partie de l' énergie fournie à un système qui n'est pas transformée en énergie utile . Cette énergie est généralement perdue sous forme de chaleur, frottements , bruit ou vibrations . sont principalement classées en 3catégorie :

a. Pertes mécaniques :

✓ Perte dans paliers radiaux.

✓ axiaux Perte dans paliers.

✓ Pertes d'accouplement.

✓ Pertes dans la garniture mécanique.

✓ Pertes par frottement des surfaces immergées en rotation .

✓ Pertes par frottement de disque.

✓ Pertes par frottement sur un cylindre.

b. Pertes par fuites :

✓ Fuite sur barrage arrière d'une roue équilibrée.

✓ Fuite sur barrage arrière d'une roue équilibrée.

✓ Fuite externes.

c. Pertes hydrauliques :

Les pertes hydrauliques sont constituées par :

✓ Les pertes dans le conduit d'amenée.

✓ Les pertes dans le conduit d'amenée.

✓ Les pertes dans les diffuseurs lisses.

✓ Les pertes dans les canaux de retour.

II.6 Notion d'efficacité énergétique :

L'énergie est la capacité d'un système à produire un travail, provoquer un

mouvement, un rayonnement ou de la chaleur. Elle se présente sous plusieurs formes :

Énergie primaire : disponible directement dans la nature, fossile ou renouvelable.

Énergie secondaire : transformée à partir de l'énergie primaire, comme l'électricité ou les produits pétroliers raffinés.

Énergie finale : utilisée pour satisfaire les besoins humains, directement ou indirectement.

Énergie utile : portion réellement exploitée par l'utilisateur après toutes les conversions.

Cette classification permet de comprendre le parcours de l'énergie depuis sa source jusqu'à son usage effectif.

II.6.1 Type de l'énergie dans station de pompage :

I. L'énergie mécanique 🔧

L'énergie mécanique est l'énergie que possède un objet en raison de son mouvement ou de sa position, et elle comprend l'énergie cinétique et l'énergie potentielle :

- Énergie cinétique : liée au mouvement des objets ; plus la vitesse est grande, plus l'énergie est importante.
- Énergie potentielle : énergie stockée dans les objets immobiles, dépendant de leur position. Elle se manifeste lorsqu'elle se transforme en énergie cinétique.

II. L'énergie électrique 🔌

L'énergie électrique est l'énergie transférée via le mouvement des charges électriques pour alimenter les équipements. Elle est fournie par des sources comme des alternateurs ou le réseau électrique et utilisée pour faire fonctionner les pompes et moteurs qui assurent le transport de l'eau.

III. Énergie hydraulique 💧

L'énergie hydraulique est l'énergie de l'eau exploitée pour la transporter et la stocker, grâce à la conversion de l'énergie mécanique des pompes en énergie hydraulique.

IV. Énergie thermique (pertes) 🌡️

Des pertes d'énergie apparaissent sous forme de chaleur à cause du frottement dans les tuyaux, valves et pompes.

Ces pertes sont à minimiser pour améliorer le rendement global.

V. Énergie de contrôle / information

L'énergie consommée par les capteurs, automates et systèmes de régulation pour contrôler le débit, la pression et l'efficacité énergétique.

II .6.2.1 L'efficacité énergétique :

est un paramètre sans dimension qui mesure la capacité d'un système à utiliser l'énergie de manière optimale, en comparant l'énergie réellement utile récupérée à l'énergie totale consommée pour faire fonctionner le système. Elle est souvent confondue avec le rendement, mais ces deux notions diffèrent : le rendement correspond au rapport entre la performance réelle et la performance théorique maximale, et sa valeur est toujours comprise entre 0 et 1.

En économie, l'efficacité énergétique est assimilée à l'efficience énergétique, qui vise à réduire la consommation d'énergie tout en maintenant le même niveau de service. Elle peut également être évaluée par comparaison à une valeur de référence, telle que la production, la surface chauffée ou la distance parcourue. Cette notion s'applique à de nombreux systèmes énergétiques, tels que les installations de pompage, les industries et peut être exprimée scientifiquement comme le rapport entre le rendement réel d'un système et son rendement maximal, permettant ainsi d'évaluer son niveau d'optimisation énergétique. [8]

II.6.2.2 Importance de l'efficacité énergétique

➤ Réduction de la consommation d'énergie

➤ Diminution des coûts d'exploitation

➤ Amélioration du rendement des équipements

➤ Réduction des pertes énergétiques

➤ Prolongation de la durée de vie des installations

➤ Diminution de l'impact environnemental

➤ Optimisation des performances des systèmes

➤ Aide à l'analyse et au diagnostic des installations

➤ Facilite la prise de décision pour l'amélioration

II.6.3 Indicateurs énergétiques aux systèmes de pompage :

L'efficacité totale dite "Wire-to-water" représente le rendement global d'un système de pompage, depuis l'entrée électrique jusqu'à la sortie hydraulique de la pompe. Elle intègre

l'ensemble des composants du système, notamment le moteur, la pompe, et éventuellement les variateurs de vitesse ou les systèmes de transmission. Cette approche permet d'évaluer de manière précise la performance globale d'une installation. [9]

L'énergie spécifique (Es), exprimée généralement en kWh/m³, correspond à l'énergie consommée pour pomper une unité de volume d'eau. Elle constitue un indicateur fiable pour mesurer la consommation énergétique réelle d'un système de pompage, car elle prend en compte l'ensemble de l'installation et non uniquement le groupe motopompe. Le calcul de l'énergie spécifique est relativement simple en phase d'exploitation, grâce à la mesure du volume pompé et de l'énergie consommée. En revanche, lors de la phase de conception, ce calcul devient plus complexe et nécessite plusieurs paramètres tels que le débit, la durée de fonctionnement, les variations de niveau d'eau et les pertes dans les conduites.

II.6.4 Facteurs influençant l'efficacité énergétique :

Un facteur d'influence est une donnée variable et mesurable qui a un impact significatif sur la consommation énergétique d'un usage donné. Parmi ces facteurs, on peut citer la production réalisée, le nombre d'heures de fonctionnement, la rigueur climatique ou encore la consigne de température d'un réseau sur une même période. Ces facteurs sont essentiels pour la mise en place et le suivi des Indicateurs de Performance Énergétique (IPE), car ils permettent d'interpréter correctement les résultats et d'identifier les véritables marges d'amélioration énergétique. Lorsqu'on compare des consommations à différentes périodes ou qu'on analyse leur évolution, il est indispensable de tenir compte de ces facteurs sans cela les comparaisons ne seraient pas pertinentes et pourraient conduire à des conclusions erronées.[8]

II.6.5 Consommation énergétique des systèmes de pompage industriels :

Systèmes de pompage industriels représente une part importante de l'énergie utilisée dans l'industrie, pouvant atteindre jusqu'à 20 à 30 % de la consommation électrique totale dans certains secteurs. Elle dépend de plusieurs facteurs techniques et opérationnels liés au fonctionnement des pompes et du réseau hydraulique. [10]

D'un point de vue technique, la consommation énergétique est principalement influencée par le débit, la hauteur manométrique totale (HMT), le rendement de la pompe, ainsi que celui du moteur électrique. [11]

Une pompe mal dimensionnée ou fonctionnant loin de son point de rendement optimal consomme plus d'énergie que nécessaire. De plus, les pertes de charge dans les conduites (frottements, coudes, vannes) augmentent la puissance requise.

Sur le plan de l'exploitation, une mauvaise gestion du système, comme le fonctionnement en continu à pleine charge, l'absence de régulation ou l'utilisation de vannes pour contrôler le débit, entraîne un gaspillage énergétique important. À l'inverse, l'intégration de variateurs de vitesse permet d'adapter la puissance aux besoins réels et de réduire significativement la consommation.

II.6.7Maintenannce et gestion énergétique des installations industrielles :

La maintenance des pompes et moteurs est cruciale pour garantir leur efficacité énergétique et leur fiabilité dans les installations industrielles. Elle inclut des actions préventives telles que le nettoyage des filtres, la lubrification des paliers, le contrôle de l'alignement et la vérification des jeux mécaniques, ainsi que des interventions correctives pour réparer toute défaillance. Une maintenance régulière permet de prévenir les pertes d'énergie liées aux frottements, aux fuites ou au mauvais fonctionnement, de prolonger la durée de vie des équipements et de maintenir un rendement optimal, contribuant ainsi à l'optimisation énergétique globale des systèmes industriels. [8][12]

La gestion de l'énergie dans l'industrie désigne l'ensemble des méthodes, outils et pratiques qui permettent de comprendre, de surveiller et d'optimiser les consommations énergétiques d'un site de production. Elle ne se limite pas à réduire les dépenses, car elle vise à améliorer la performance énergétique globale du site en tenant compte de ses procédés, de ses utilités et de son organisation interne.

Ainsi, La gestion de l'énergie dans les industries repose sur une organisation structurée qui nécessite :

Place de L'ISO 50001 joue un rôle central dans la gestion de l'énergie industrielle, car elle englobe et structure l'ensemble des stratégies de performance énergétique. Elle permet de :

- Définir des objectifs énergétiques précis .
- Planifier et organiser les actions à mettre en œuvre .
- Désigner les responsables et coordonner les services.
- Suivre les indicateurs et la consommation d'énergie .
- Mettre en place l'amélioration continue.

II.6.8.1Utilisation des systèmes de contrôle pour améliorer l'efficacité énergétique :

Les systèmes de contrôle de puissance sont des technologies intégrées conçues pour gérer la production, la distribution et la consommation d'énergie électrique. Ils garantissent que l'énergie électrique est fournie à la tension et à la fréquence appropriées, optimisant ainsi les performances des appareils et systèmes électriques.[13][14]

II.6.8.2Composants des systèmes de contrôle :

- **Contrôleurs** : Ces dispositifs régulent le flux d'énergie et maintiennent des conditions de fonctionnement optimales.
- **Capteurs** : Utilisés pour surveiller divers paramètres tels que la tension, le courant et la température.
- **Actionneurs** : Dispositifs qui exécutent des commandes de contrôle pour ajuster les flux de puissance.

- **Réseaux de communication** : Systèmes qui facilitent l'échange de données entre les composants pour un contrôle coordonné

II.6.8.3Types de système de contrôle :

- Contrôle tout ou rien (ON/OFF)

- Contrôle en boucle fermée (régulation automatique) : adaptation automatique

- Contrôle par variateur de fréquence : réduction directe de la consommation

-Système de supervision (SCADA) et Automates programmables (PLC) : gestion intelligente

-Contrôle multi-pompes (cascade) :optimisation du nombre de pompes

-Maintenance prédictive assistée par contrôle

II.6.9Application de l'efficacité énergétique dans les systèmes de pompage :

Dans un système de pompage, l'efficacité énergétique se retrouve dans toutes les parties du système, car chaque composant influence la consommation d'énergie:

➡️ Pompes : choisir des pompes à haut rendement, correctement dimensionnées pour le débit et la pression requis. L'efficacité énergétique se traduit par moins de pertes mécaniques et moins d'électricité consommée.

➡️ Moteurs électriques : utiliser des moteurs à haut rendement (IE3 ou IE4) pour réduire les pertes électriques. Ajuster leur vitesse avec des variateurs permet d'adapter l'énergie fournie au besoin réel.

➡️ Tuyauterie et réseau hydraulique : un tracé optimisé, des diamètres adaptés et des coudes doux réduisent les pertes de charge et donc la consommation d'énergie des pompes.

➡️ Systèmes de contrôle et supervision : capteurs et automates permettent de mesurer débit, pression et consommation, et d'ajuster automatiquement le fonctionnement des pompes et moteurs. Cela évite le gaspillage d'énergie en adaptant le système à la demande réelle.

➡️ Maintenance : un entretien régulier (nettoyage, lubrification, alignement) assure que les équipements fonctionnent à leur rendement optimal, limitant les pertes d'énergie dues aux frottements ou à l'usure.

II.6.10 Bilan énergétique d'une station de pompage:

(La figure 12) suivante présente le bilan énergétique d'une station de pompage, avec l'ordre de grandeur des rendements des principaux composants de la station. Le rendement de chacun de ces composants est compris entre une valeur minimale liée à l'état technique dégradée de l'élément (mauvaise gestion de la fonction maintenance) ainsi que le mode de son exploitation inadéquat, et une valeur maximale en cas d'une gestion optimale de l'équipement.

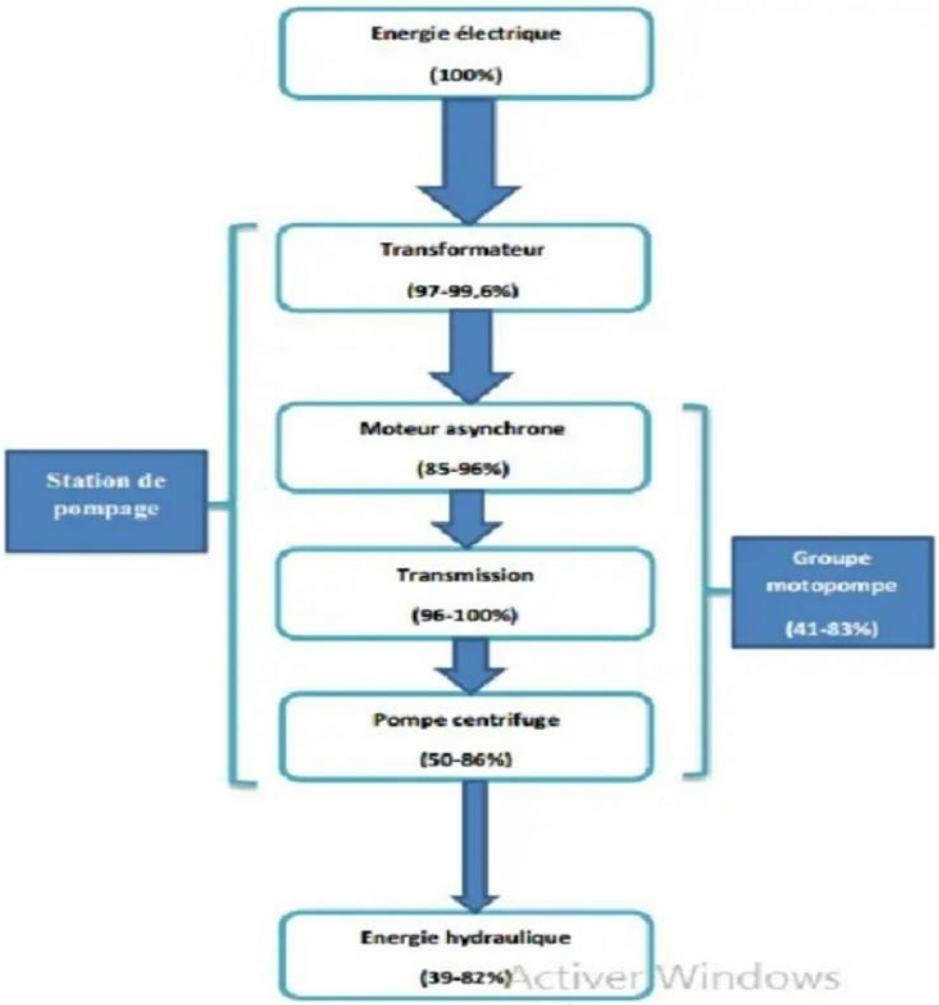


Figure 12:Bilan énergétique d'une station de pompage

Chapitre III :

Intégration des technologies VFD et PID dans les station de pompage

III .1 Introduction :

Les systèmes de pompage représentent près de 20 % de la consommation électrique mondiale, et jusqu'à 50 % dans certaines industries. »

En Algérie, le secteur de l'eau constitue l'un des plus grands consommateurs d'énergie électrique nationale. Avec le développement croissant des stations de dessalement d'eau de mer le long du littoral algérien, notamment dans le cadre des grands projets hydrauliques visant à garantir la sécurité hydrique du pays, la maîtrise de la consommation énergétique des systèmes de pompage est devenue une priorité stratégique et économique majeure.

Les stations de pompage traditionnelles, fonctionnant à vitesse fixe et à pleine puissance en permanence, présentent des limitations importantes. Elles génèrent un gaspillage énergétique considérable, une usure prématurée des équipements mécaniques, des fluctuations de pression nuisibles au réseau de distribution, ainsi que des coûts d'exploitation et de maintenance élevés. Cette approche rigide ne permet pas d'adapter le fonctionnement de la pompe aux besoins réels et variables du réseau hydraulique.

Face à ces contraintes, les études et retours d'expérience industriels démontrent qu'un variateur de fréquence correctement dimensionné et associé à un régulateur PID permet de réduire la consommation énergétique d'une installation de pompage de 30 à 50 %. En adaptant en continu la vitesse du moteur à la demande réelle du réseau, cette combinaison technologique assure non seulement des économies d'énergie significatives, mais aussi une pression stable, une réduction des contraintes mécaniques et une prolongation de la durée de vie des équipements

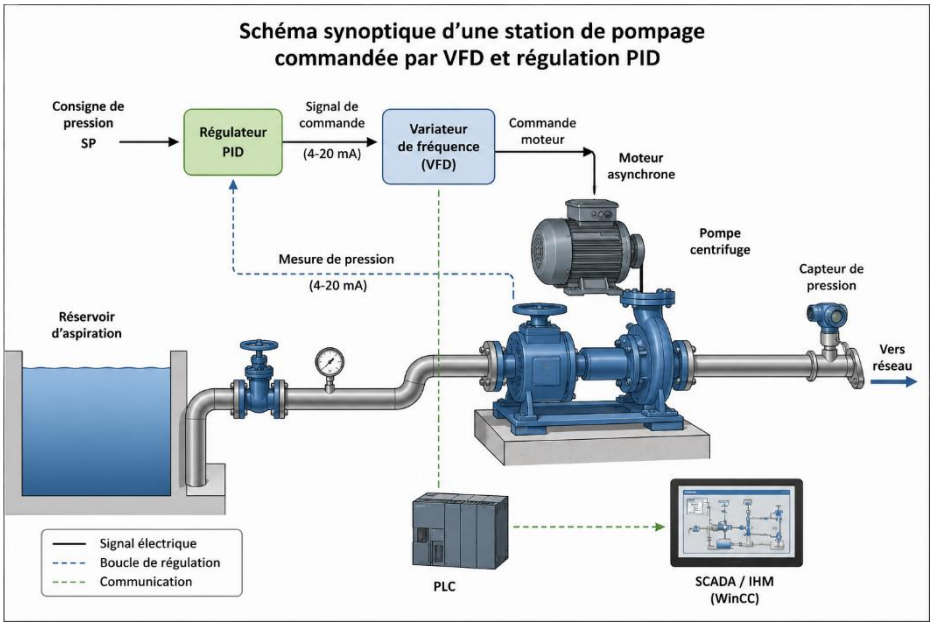


Figure 1 :station de pompage commandée par VFD et PID

III.2 Les variateurs de fréquence :

Un variateur de fréquence est un dispositif de commande de la vitesse de rotation d'un moteur électrique à courant alternatif. Il contrôle la fréquence de l'alimentation électrique fournie au moteur. Un variateur de fréquence est un type spécifique d'entraînement à vitesse variable. Les variateurs de fréquence sont également appelés entraînements à fréquence variable (VFD), entraînements à vitesse variable (VSD), entraînements AC ou inverseurs.



A entraînement à fréquence variable permet aux moteurs de ne fonctionner qu'à la vitesse requise par le système, minimisant ainsi le gaspillage d'énergie et les contraintes mécaniques. Lorsqu'il est appliqué à des systèmes d'eau ou de fluides - connu sous le nom de pompe à entraînement à fréquence variable - il permet non seulement de réduire les coûts d'exploitation, mais aussi d'assurer une régulation de la pression plus régulière, de réduire la fréquence de maintenance et de prolonger la durée de vie de l'équipement .



Figure 2 :Installation des variateurs de fréquence

III.2.1 Les composants d'un variateur de fréquence :

- Le Redresseur :souvent matérialisé par un pont de Diodes, se charge "de convertir" la tension d'entrée alternative en une tension continue.
- Le Bus Courant Continu :appelé Liaison CC ou filtre, joue quant à lui un rôle de régulateur du signal.
- l'Onduleur à IGBT :comme son nom l'indique, va permettre de renvoyer une onde sinusoïdale en rendant la tension à nouveau Alternative à une tension et une fréquence voulue par l'utilisateur grâce à la Modulation de Largeur d'Impulsions (MLI). Dans l'industrie, de plus en plus de moteurs électriques basse tension sont pilotés par un

convertisseur de fréquence statique MLI. Ces accessoires industriels à part entière,deviennent les interfaces entre les moteurs à induction et la source d'énergie.

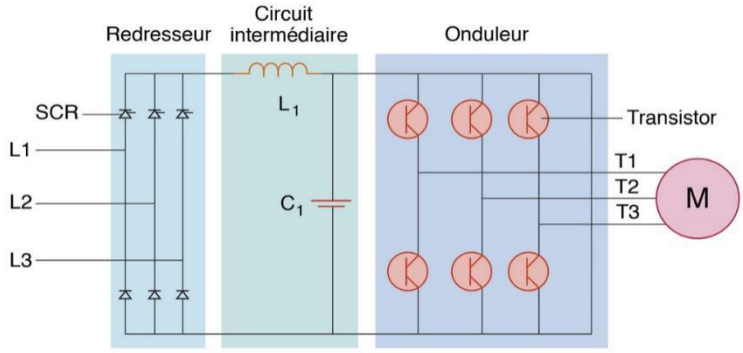


Figure 3 : schéma de principe d'un VFD

- Le circuit de commande : est l'unité intelligente du variateur. Il gère le fonctionnement global, contrôle la fréquence et la tension de sortie
- Système de refroidissement :est un ensemble de dispositifs (ventilateurs ou dissipateurs thermiques) destiné à évacuer la chaleur produite par les composants électroniques afin de garantir un fonctionnement sûr et fiable.
- L'interface utilisateur : permet de démarrer et d'arrêter le moteur ainsi que d'en ajuster la vitesse. Elle peut aussi inclure le fonctionnement du moteur en sens inverse, un sélecteur pour choisir entre commande manuelle et automatique, respectivement locale ou à distance, de la vitesse. L'interface dispose d'un affichage qui donne des informations sur le statut du moteur .
- Capteurs et dispositifs de protection : ce sont des éléments intégrés qui surveillent les grandeurs électriques (courant, tension, température) et protègent le variateur contre les défauts tels que la surcharge, le court-circuit ou la surchauffe.

III.1.2 Fonctionnement de variateur de fréquence :

Un variateur de fréquence est basé sur les caractéristiques d'un réseau donné connecté à un moteur électrique. Le variateur de fréquence est chargé de contrôler la vitesse de rotation d'un moteur (figure 4) . Il convertit le courant alternatif d'un système électrique en courant continu. À cet effet, on utilise le redresseur. Les condensateurs interviennent à l'étape suivante. Ce sont les éléments qui se chargent du courant continu converti par le redresseur et qui rendent la forme d'onde plus . Enfin, il y a le variateur. Cette partie du variateur de fréquence est responsable de la conversion du courant continu en courant alternatif. C'est le point où un moteur électrique reçoit exactement la bonne quantité d'énergie, et où ses besoins sont ajustés à une tension et une fréquence appropriées.[15]

.

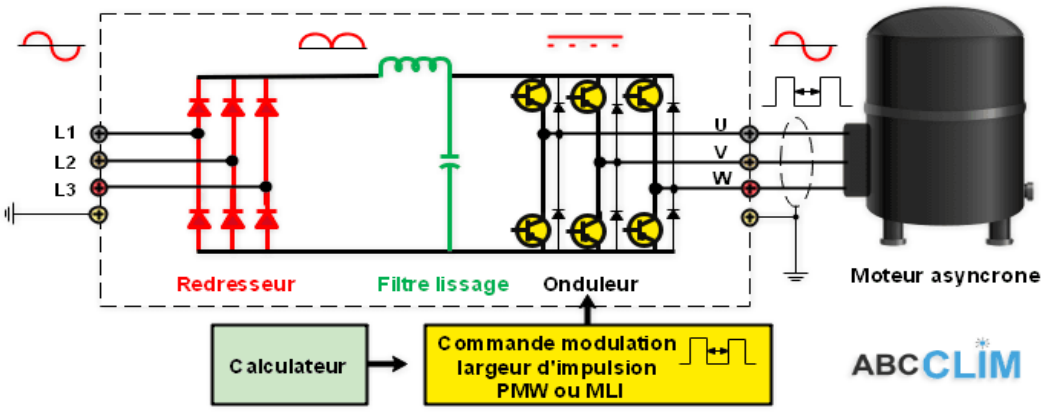


Figure 4 :étape de conversion d'énergie dans un VFD

III.1.3 Méthodes de contrôle du variateur :

La plupart des variateurs modernes prennent en charge différents modes de contrôle en fonction de la complexité de l'application :

- **Contrôle V/F (tension/fréquence)** - Idéal pour les moteurs à usage général où la simplicité et la stabilité sont des priorités.
- **Contrôle des vecteurs** - Fournit une régulation précise du couple et de la vitesse, adaptée aux systèmes industriels de haute performance.
- **Contrôle sans capteur** - Permet un fonctionnement sans heurts même sans capteurs externes, ce qui réduit la complexité de la maintenance.

III.1.4 l'importance du variateur de fréquence dans stations de pompage :

Les systèmes de pompage traditionnels à vitesse constante présentent des problèmes d'efficacité, de consommation énergétique et d'usure mécanique. Les pompes à variateurs de fréquence (VFD) offrent une solution en permettant un contrôle précis de la vitesse, améliorant ainsi l'efficacité, la fiabilité et la régulation des systèmes de pompage pour l'eau, l'irrigation ou les applications industrielles.[16]

❖ **Contrôle stable de la pression et du débit :**

L'un des principaux avantages d'une pompe à fréquence variable est de maintenir automatiquement une pression et un débit constante, en adaptant la vitesse du moteur à la demande, ce qui économise de l'énergie et de protéger le système contre l'usure.

❖ **Efficacité énergétique et économies :**

L'adaptation de la vitesse de la pompe à la demande réelle permet de consommer moins d'énergie et de réduire les coûts d'exploitation. L'optimisation de la consommation améliore le rendement global du système.

❖ **Démarrage progressif et protection du système :**

Les démarrages progressifs limitent les chocs mécaniques sur les pompes et les canalisations, réduisent l'usure des composants et prolongent la durée de vie de l'installation. De plus, ils

contribuent à la protection du système en minimisant les risques de surcharges et de dommages aux équipements , et aussi prévient les coups de bélier.

❖ **Amélioration de la fiabilité et de la maintenance du système :**

Le VFD améliore la fiabilité et réduit la maintenance du système en gérant la vitesse, le couple et l'accélération de manière douce, ce qui limite l'usure des composants mécaniques. Les fonctions de diagnostic et de détection des défaillances alertent les opérateurs avant toute panne, renforçant la sécurité et la fiabilité des opérations.

III.1.5 Comment choisir le variateur de fréquence :

Choisir le bon variateur de fréquence ne consiste pas seulement à faire correspondre la tension et la puissance, mais aussi à comprendre les exigences spécifiques de votre système et à garantir des performances, une fiabilité et une longévité optimales. Un mauvais choix peut entraîner une inefficacité, une surchauffe ou une défaillance prématurée de l'équipement. Voici comment prendre la bonne décision :

a) Déterminer les exigences du moteur et de la charge :

La première étape consiste à connaître les caractéristiques de votre moteur. la puissance, la tension et le courant nominaux. Un variateur de vitesse correctement dimensionné garantit un fonctionnement sans heurts et sans surcharge. Par exemple :

Le KUVO KV10 Variateur de fréquence soutiens entrée monophasée (200-240V) ou entrée triphasée (380-480V) ce qui le rend idéal pour les équipements de petite et moyenne taille tels que les ventilateurs, les convoyeurs et les pompes compactes.

Pour les pompes de plus grande taille, à l'échelle industrielle, le Série KV90M - disponible en plusieurs niveaux de puissance de 0,75kW à 30kW - offre la capacité de couple et de courant nécessaire pour les applications exigeantes.

b) Choisir la bonne classe de tension :

Le choix de la tension d'entrée adaptée est crucial pour la stabilité du système. Par exemple, les modèles KV90M-22-30 kW et KV90M-15-18,5 kW fonctionnent efficacement en Algérie avec une alimentation triphasée de 380-480 V, garantissant une sortie stable même en cas de fluctuations du réseau. Cette flexibilité assure des performances constantes pour les applications industrielles, commerciales et agricoles.[16]

c) Évaluer la méthode de contrôle et le type d'application :

Différents modes de contrôle répondent à des besoins différents :

- Contrôle V/F = Simple et fiable pour les applications à couple constant telles que les ventilateurs ou les convoyeurs.
- Contrôle des vecteurs = Fournit une réponse précise au couple, parfaite pour les systèmes de charge dynamique tels que les pompes ou les compresseurs.
- Contrôle PID = Couramment intégré dans pompes à entraînement à fréquence variable pour maintenir automatiquement une pression ou un débit constant.

La Série KV90M soutiens Contrôle PID et V/F, Il est donc adapté à divers systèmes d'alimentation en eau, de circulation et d'irrigation qui nécessitent un contrôle intelligent de la pression.[22]

d) Tenir compte des facteurs liés à l'environnement et à l'installation :

Il est important de tenir compte des conditions d'environnement comme la température, l'humidité, la poussière et les vibrations, car elles influencent les performances des variateurs.

- Pour les petits espaces, certains modèles sont compacts et assurent une bonne dissipation thermique.
- Pour les grandes installations industrielles, des modèles plus puissants avec des composants robustes et un meilleur système de refroidissement sont utilisés, afin d'assurer un fonctionnement fiable en continu.

e) Vérifier les dispositifs de sécurit de protection et de communication :

Les variateurs de vitesse modernes sont plus que des régulateurs de vitesse : ce sont des systèmes de protection intelligents. Recherchez des caractéristiques telles que :

- Protection contre les surtensions et les sous-tensions
- Détection de surintensité et de surcharge
- Protection contre les courts-circuits et les pertes de phase
- Ports de communication intégrés pour l'intégration du système

La Série KUVO KV90M intègre des modules IGBT avancés et une logique de contrôle numérique, ce qui permet d'obtenir des performances précises avec une excellente protection du système.

f) Penser à l'évolutivité future :

Si vous prévoyez une extension du système ou une augmentation de la capacité, choisissez un disque avec une puissance nominale légèrement supérieure ou une conception modulaire. Le système de gestion de l'information (SGI), offre une plateforme évolutive qui peut s'adapter à vos besoins opérationnels sans nécessiter de refonte majeure.

III.1.6 les principales caractéristiques de la série de pompes à entraînement à fréquence variable KUVO KV90M :

Le Série de pompes à entraînement à fréquence variable KUVO KV90M est conçu pour offrir des performances élevées, une grande efficacité énergétique et une grande durabilité dans les applications industrielles et les systèmes de distribution d'eau. Doté d'une technologie IGBT avancée et d'algorithmes de contrôle intelligents, il assure une gestion et une protection précises des moteurs pour différents types de pompes et de moteurs. Qu'elle soit utilisée pour l'irrigation, le chauffage, la ventilation et la climatisation ou la fabrication, la série KV90M offre un contrôle fiable de la vitesse et un fonctionnement en douceur .

❖ **Gamme de puissance KV90M et flexibilité électrique**

La série KV90M couvre une large gamme de capacités de puissance pour répondre aux différentes exigences des systèmes :

- KV90M-0.75-2.2KW : Compact et léger, idéal pour les petites pompes à eau ou les systèmes de circulation.
- KV90M-4-5.5KW : Performance équilibrée pour les systèmes de taille moyenne nécessitant un contrôle stable du débit.
- KV90M-7.5-11KW : Conçus pour un fonctionnement continu dans des applications industrielles ou agricoles.
- KV90M-15-18.5KW : Couple de sortie amélioré pour les systèmes de pompage à forte charge.
- KV90M-22-30KW : Modèle à haute capacité conçu pour les grandes stations de pompage et les installations à plusieurs moteurs.

Chaque modèle prend en charge Entrée triphasée 380V-480V et fournit une tension de sortie constante avec une efficacité de conversion élevée. Les pompes conservent ainsi des performances stables, même en cas de fluctuations de l'alimentation électrique .

❖ **Architecture matérielle robuste et performance des IGBT :**

Chaque lecteur KV90M est construit en utilisant modules IGBT de qualité industrielle pour une conversion efficace de l'énergie et une production minimale de chaleur. La conception optimisée du refroidissement garantit un fonctionnement stable, même dans des environnements à forte charge ou à haute température. Ces caractéristiques permettent au variateur de maintenir une production stable et d'éviter les temps d'arrêt dans des conditions de travail exigeantes .

III.1.7 Optimisation du rendement des pompes par variateur de fréquence (VFD) :

Le pilotage d'une pompe à l'aide d'un variateur de fréquence vise principalement à réduire la consommation énergétique tout en maintenant de bonnes performances hydrauliques. Pour y parvenir, il est essentiel de bien comprendre les relations entre les paramètres fondamentaux du fonctionnement de la pompe : le débit (Q), la hauteur manométrique (H), le rendement (η) et la puissance absorbée (P).

L'objectif principal consiste à faire fonctionner la pompe le plus proche possible de son point de meilleur rendement (PMR), tout en ajustant la vitesse de rotation en fonction des variations des conditions d'exploitation (niveau d'eau, demande, pertes de charge, etc.). Le variateur permet ainsi d'adapter en continu le fonctionnement de la pompe, évitant les pertes d'énergie liées aux régulations classiques (vannes, étranglement…).

Le principe de base repose sur le fait que la puissance hydraulique nécessaire dépend directement du débit et de la hauteur de refoulement, tout en étant influencée par le rendement global du système. Cela se traduit par une relation où la puissance est proportionnelle au produit de ces grandeurs, corrigée par le rendement :

$$P = \frac{(\rho \times g \times H \times Q)}{\eta}$$

III .1.8 Lois d'affinité des pompes :

Les lois d'affinité de la pompe sont un ensemble de formules qui aident à prédire le débit, la hauteur et la puissance absorbée à différentes vitesses d'arbre.

Les lois d'affinité s'appliquent exactement aux écoulements sans friction et incompressibles. Pour les applications techniques, elles sont à considérer comme une solution approximative.

En général, ces lois d'affinité sont indépendantes de la manière dont le changement de vitesse est techniquement mis en œuvre. Traditionnellement, un changement de vitesse pas à pas était mis en œuvre pour les petites et moyennes pompes en changeant les enroulements. Entre-temps, ceux-ci ont été largement remplacés par des convertisseurs de fréquence.

Les entraînements électriques lents sont très coûteux pour les grandes pompes centrifuges, c'est pourquoi des réducteurs sont utilisés dans ces cas.

Lorsque faites varier la vitesse de la pompe avec un variateur de fréquence, les lois d'affinité décrivent comment les paramètres de la pompe évoluent :

Paramètre	Relation au rapport de vitesse	formule
Débit (Q)	Proportionnel à la vitesse	$Q_2 = Q_1 \times (N_2/N_1)$
Hauteur de pression (H)	Proportionnel au carré de la vitesse	$H_2 = H_1 \times (N_2/N_1)^2$
Puissance (P)	Proportionnel au cube de la vitesse	$P_2 = P_1 \times (N_2/N_1)^3$

Tableau III .1 : Formules des lois affinité

(N = fréquence en Hz)

III.2.1 Boucle de contrôle (PID) :

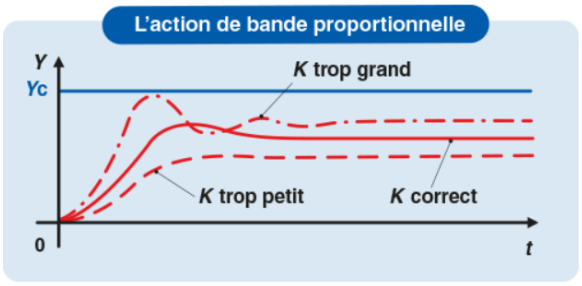
La régulation PID (Proportionnelle, Intégrale, Dérivée) est un mécanisme de contrôle en boucle fermée essentiel dans l'industrie, utilisé pour maintenir une grandeur physique (température, vitesse, pression) à une valeur de consigne constante. Il calcule l'erreur entre la consigne et la mesure, agissant via trois modes pour minimiser l'écart rapidement et de façon stable.

L'équation de PID :

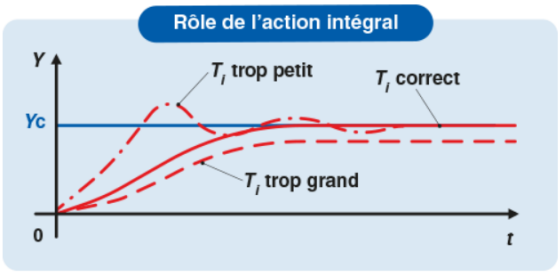
$$u(t) = K_p e(t) + K_i + \int e(t)dt + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

-Les Trois Composantes du PID :

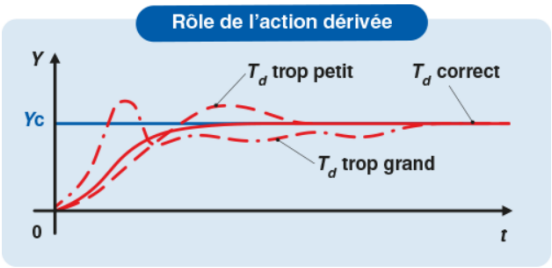
Action Proportionnelle (P) : L'action de bande proportionnelle équivaut à multiplier l'erreur par un coefficient proportionnel (k_p). Cette action provoque l'ajustement de la sortie du régulateur de manière à être proportionnelle à l'erreur. Ainsi, si l'erreur ou la perturbation est grande, la correction sera également importante, et vice versa.[17]



Action Intégrale (I) : Corrige l'erreur cumulée dans le temps, éliminant l'erreur statique résiduelle pour atteindre précisément la consigne. Cette action amène le système progressivement plus près de la consigne en ajustant la sortie en fonction de l'erreur intégrée. Le coefficient intégral (k_i) détermine l'influence de cette composante.



Action Dérivée (D) : L'action dérivée concerne le taux de changement de l'erreur. Cette action prédictive permet au système de réagir à des événements futurs en se basant sur les tendances observées. Le coefficient dérivé (k_d) ajuste l'influence de cette action pour un meilleur contrôle.



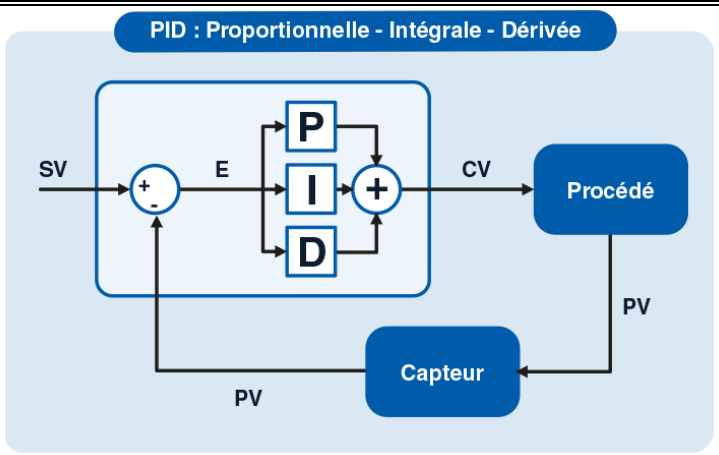


Figure 5 : schéma bloc d'une boucle de régulation fermée

III.2.2 Fonction de transfert des 3 actions :

- **Action proportionnelle :**

$$Up\ (P) = K\ p.E\ p \quad \Rightarrow \quad P(p)\ =\ kp$$

- **Action intégrale :**

$$Ui\ (\mathrm{p}) = \frac{1}{Ti.p}\ .\ \mathrm{E}\ (\mathrm{p}) \quad \Rightarrow \quad \mathrm{I}\ (\mathrm{p}) = \frac{1}{Ti\ .P}$$

- **Action dérivée** :

$$\mathrm{Ud}\ (\mathrm{p}) = Tp\ .\mathrm{p}\ .\mathrm{E}(\mathrm{p}) \quad \Rightarrow \quad \mathrm{D}(\mathrm{p}) = \mathrm{Td}\ .\mathrm{p}$$

➢ **Influence des actions sur les critères des performances :**

		Précision	Stabilité	Rapidité
Kp	P	↗	↘	↗
1/Ti	I	↗	↘	↘
Td	D	↘	↗	↗

Tableau III.2 : Influence des paramètres de PID sur le système

3.2.3 Principales architectures de contrôle :

1.Niveau de cuve / chambre de pompage :

La régulation du niveau dans une cuve ou une chambre de pompage constitue un cas typique de processus intégrateur, où la dynamique dépend directement de la différence entre le débit entrant et le débit sortant. Dans ce contexte, un régulateur de type PID, généralement utilisé sous forme PI, agit sur la vitesse des pompes à travers des variateurs de fréquence afin de maintenir le niveau autour d'une consigne donnée. Le réglage des paramètres peut être réalisé par la méthode Lambda (IMC), particulièrement adaptée aux processus intégrateurs, permettant d'obtenir un compromis satisfaisant entre rapidité et stabilité. Cette architecture nécessite également l'intégration de mécanismes tels que l'anti-windup et la limitation des.

2. Pression dans une station de pompage :

La régulation de la pression dans une station de pompage est l'une des applications les plus courantes des systèmes PID en milieu industriel. Dans ce cas, la pression mesurée est comparée à une consigne fixe (par exemple 6 bar), et l'erreur est traitée par un régulateur PID implémenté dans un automate Siemens, VFD pour une pompe principale + démarrage progressif de pompes additionnelles , des pompes additionnelles peuvent être démarrées ou arrêtées de manière progressive selon des seuils prédéfinis, permettant de couvrir les besoins élevés tout en optimisant la consommation énergétique et en limitant l'usure des équipements.

3. Cascade / multi-boucles :

L'architecture en cascade, ou multi-boucles, est une stratégie de régulation avancée permettant d'améliorer les performances dynamiques du système. Elle repose sur l'utilisation de deux boucles imbriquées : une boucle principale (lente), généralement dédiée à la régulation du niveau, et une boucle secondaire (rapide), dédiée au contrôle du débit. [19]

4. Réseaux avec pompes non reglues :

Dans ce cas, une pompe principale avec variateur est régulée par PID, tandis que des pompes auxiliaires fonctionnent en tout ou rien. Les commutations peuvent perturber le système, donc des solutions comme l'hystérésis, la temporisation et l'ajustement des gains sont utilisées pour stabiliser la régulation.[20]

3.2.4 Réglage et performance des PID :

Les contrôleurs PID peuvent être réglés manuellement ou automatiquement par autoréglage. Le réglage manuel consiste à ajuster progressivement les paramètres P, I et D selon l'expérience de l'opérateur. En revanche, l'autoréglage permet au régulateur de déterminer automatiquement les paramètres optimaux en analysant la réponse du système à une perturbation.



Figure 6 : Dispositif de PID

-Parmi les méthodes d'autoréglage les plus utilisées, on peut citer :

- **la méthode de Ziegler-Nichols :**

Cette méthode consiste à amener le système ou le procédé à osciller en ajustant le gain proportionnel (Kp) jusqu'à ce qu'il atteigne la limite de stabilité . La période d'oscillation et le gain critique sont ensuite utilisés pour déterminer les coefficients proportionnel (Kp), intégral (Ki) et dérivé (Kd) optimaux. [21]

- **La méthode de Cohen-Coon** :

méthode de Cohen-Coon est une technique de réglage du PID spécialement conçue pour les procédés industriels présentant un temps mort (retard) significatif, ce qui est fréquent dans les systèmes de pompage (longues canalisations, capteurs éloignés, etc.).Elle repose sur l'approximation du procédé par un modèle du premier ordre avec temps mort (FOPDT : First Ordre Plus Dead Time.

- **les méthodes basées sur des modèles (model-bases) :**

consistent à établir une représentation mathématique plus précise du procédé à partir de données expérimentales, puis à calculer les paramètres du PID selon des critères de performance tels que la stabilité, le temps de réponse et la minimisation de l'erreur. Ces procédures visent principalement à minimiser l'erreur entre la consigne et la sortie du système, tout en garantissant une bonne stabilité, un temps de réponse rapide et un dépassement limité.

III .3 Intégration du VFD et PID dans une station de pompage hydraulique :

Dans les systèmes modernes de distribution d'eau, le maintien d'une pression stable est essentiel à l'efficacité, à la sécurité et au confort des utilisateurs. Les systèmes de pompage traditionnels fonctionnent souvent à vitesse fixe, ce qui peut entraîner des fluctuations de pression en fonction de la demande en eau. Par conséquent, les canalisations, les vannes et les pompes subissent des contraintes inutiles et un gaspillage d'énergie. C'est pourquoi les systèmes de distribution d'eau à utilisant une commande de pompe par variateur de fréquence

(VFD) sont devenus la solution privilégiée dans les applications résidentielles, commerciales et industrielles. En ajustant la vitesse du moteur en temps réel, un variateur de fréquence garantit une (pression ;niveau ; débit) d'eau stable tout en réduisant la consommation d'énergie. Un autre avantage clé des variateurs modernes réside dans leur régulateur PID intégré, conçu pour les applications en boucle fermée. Au lieu de dépendre d'un système de contrôle externe, ce régulateur interne traite directement les signaux de retour des transmetteurs. Cette conception intégrée réduit la complexité du système, diminue les coûts matériels et simplifie l'installation. Plus important encore, elle minimise les écarts de pression en calculant en continu la différence entre la pression réelle et la pression cible.



Figure 7 : schéma de câblage de régulation de pression

L'intégration d'un variateur de fréquence (VFD) avec un régulateur PID permet d'assurer un contrôle précis et automatique des variables de procédé, notamment la pression. Le PID reçoit en continu la valeur mesurée par le transmetteur de pression et la compare à la valeur de consigne Dans un système de pompage à variateur de fréquence, un capteur de pression installé sur la conduite de sortie mesure en continu la pression de l'eau. Il calcule ensuite l'erreur entre ces deux valeurs et génère un signal de commande proportionnel, intégral et dérivé. Ce signal est transmis au VFD sous forme analogique (0–10 V ou 4–20 mA), afin d'ajuster en temps réel la fréquence d'alimentation du moteur. Ainsi, la vitesse de la pompe est automatiquement modifiée pour maintenir la pression constante dans le réseau, indépendamment des variations de la demande. Cette intégration permet non seulement d'améliorer la stabilité du système et la précision du contrôle, mais aussi de réduire la consommation énergétique et les contraintes mécaniques sur les équipements, grâce à une régulation fluide et progressive de la vitesse du moteur.

III .4 Quels dispositifs de rétroaction sont utilisés avec la régulation PID ?

Un élément crucial de l'analogie avec la voiture est le compteur de vitesse. Sans connaître sa vitesse, tous les réglages seraient approximatifs. De même, pour les variateurs de fréquence à

régulation PID, il existe plusieurs dispositifs de retour d'information à connaître, selon la grandeur mesurée.

a) Transducteurs de pression *:*

Appelés transducteurs, capteurs de pression ou transmetteurs de pression, ces dispositifs indiquent au variateur de fréquence la pression d'un système. Ils sont généralement utilisés avec des pompes et des ventilateurs car ils mesurent la pression d'un fluide ou de l'air. Ils envoient généralement au variateur de fréquence un signal de 4 à 20 mA, bien qu'un signal de 0 à 10 V CC soit également utilisé ; nous y reviendrons plus tard.

b) Débitmètres :

Les débitmètres indiquent au variateur de fréquence la vitesse d'écoulement du liquide ou de l'air. Ils sont utilisés dans les pompes et les ventilateurs où la vitesse d'écoulement est plus importante que la pression. Ils transmettent généralement au variateur de fréquence un signal de 4 à 20 mA.

c) Capteurs de niveau :

Les capteurs de niveau indiquent le remplissage d'un réservoir. Ils sont utilisés pour les liquides contenus dans les réservoirs et non pour mesurer le travail d'une pompe ou d'un ventilateur. Ces capteurs fonctionnent selon plusieurs méthodes : capteurs à ultrasons, capteurs de pression ou capteurs radar. Ils transmettent leurs informations au variateur de fréquence via un signal de 4 à 20 mA.

d) Capteurs de température :

Les capteurs de température sont les dispositifs de rétroaction les plus particuliers parmi les régulateurs PID. Ils mesurent la température de l'air, de l'eau ou du procédé à partir d'un appareil tel qu'une thermistance ou un détecteur de température à résistance (RTD), mais nécessitent un transmetteur pour convertir leurs mesures en un signal 4-20 mA destiné à un variateur de fréquence.

➢ **Pourquoi utiliser une tension de 4 à 20 mA au lieu de 0 à 10 V CC ?**

Le signal 4-20 mA est un signal de courant, tandis que le signal 0-10 V CC est un signal de tension. Parmi les deux, le signal 4-20 mA est la norme pour les applications industrielles. Plusieurs raisons expliquent ce choix.

Le courant subit une chute de tension bien moindre que la tension sur de longues distances. Il est également moins sensible à la résistance électrique et aux perturbations. Par conséquent, l'utilisation d'une alimentation 4-20 mA réduit les risques liés à la longueur des câbles entre les dispositifs de rétroaction et le variateur de fréquence.

Vous bénéficiez également d'un « zéro actif ». Sur une tension de 0 à 10 V CC, un signal nul peut indiquer une absence de pression, mais aussi un fil coupé ou un capteur défectueux. Sur une tension de 4 à 20 mA, ces deux valeurs sont interprétées différemment : 4 mA signifie une absence de pression, tandis que 0 mA indique un fil coupé ou un capteur défectueux .

III .5 L'importance d'utilisation la régulation PID :

Des nombreux moteurs sont pilotés en programmant une vitesse fixe, puis en laissant le variateur de fréquence gérer le fonctionnement. De nombreuses installations mettent constamment en marche et arrêtent des processus afin de maintenir certaines pressions ou certains niveaux dans leur système. La régulation PID permet de s'affranchir de la surveillance constante des manomètres et des interrupteurs, ainsi que d'autres problèmes tels que :

- **Contraintes électriques :** Courant d'appel sur les moteurs fonctionnant directement sur la ligne ou sur les démarreurs progressifs
- **Contraintes mécaniques :** Les roulements, les joints d'étanchéité, les tuyaux, les turbines et autres équipements subissent des chocs de couple répétés.
- **Coup de bélier :** La colonne d'eau s'inverse et revient violemment en arrière, créant des pics de pression.
- **Régulation instable :** dépassement et sous-dépassement constants de la pression ou du niveau souhaité
- **Risque pour la garantie :** Le non-respect des recommandations du fabricant concernant le nombre de démarrages par heure peut annuler la garantie.

Si nous démarrons et arrêtons un processus manuellement, nous gaspillons probablement de l'énergie. La plupart des applications de régulation PID sont soumises aux lois d'affinité, qui stipulent qu'un léger ralentissement du processus permet de réaliser d'importantes économies d'énergie.

III .6 Application du VFD et PID dans une station de pompage :

Le projet consiste à moderniser une station de pompage destinée au transfert de l'eau dessalée à l'aide d'un variateur de vitesse (VFD) et d'un régulateur PID afin d'améliorer l'efficacité énergétique et la stabilité du système hydraulique. Le système utilise une pompe centrifuge commandée par un moteur triphasé dont la vitesse est automatiquement ajustée par le VFD selon les besoins réels en pression et en débit. Un capteur de pression mesure en temps réel la pression du réseau puis transmet les données au régulateur PID qui compare la valeur mesurée à la valeur de consigne afin de corriger automatiquement la vitesse de la pompe. Cette stratégie permet de maintenir une pression stable, réduire les pertes énergétiques et optimiser la consommation électrique du système de pompage.

III .6.1 Pompe Grundfos CR 5-10 :

La pompe Grundfos CR 5-10 est une pompe centrifuge verticale multicellulaire conçue pour le pompage d'eau propre dans les applications industrielles, commerciales et techniques. Elle fonctionne avec un moteur électrique triphasé de 1,5 kW et fournit un débit d'environ 5,8 m^3/h avec une hauteur de refoulement d'environ 52 mètres, offrant ainsi une pression élevée et une excellente efficacité énergétique. La pompe est fabriquée avec un corps robuste en fonte, des roues en acier inoxydable et une garniture mécanique résistante à la corrosion et à l'usure, garantissant une longue durée de vie et un fonctionnement fiable. Elle se distingue

également par son fonctionnement silencieux, sa compatibilité avec les variateurs de vitesse, son rendement énergétique IE3 et sa protection IP55 contre la poussière et les projections d'eau. Elle peut être raccordée à des tuyaux DN85 selon les besoins de l'installation

III .6.1.1 Courbe Hauteur manométrique / Débit :

La courbe H–Q de la pompe Grundfos CR 15-8 montre l'évolution de la hauteur manométrique totale en fonction du débit.

-À débit nul, la pompe fournit une hauteur maximale d'environ 110 mCE.

-Lorsque le débit augmente jusqu'au débit nominal d'environ 17 m³/h, la hauteur diminue progressivement vers 90 mCE.

- Cela traduit le comportement normal d'une pompe centrifuge : plus le débit augmente, plus la pression disponible diminue.

III .6.1.1.1Zone de fonctionnement optimale :

Les courbes au centre représentent le rendement montrent que Le meilleur rendement hydraulique est obtenu autour du point nominal :

Q =17 m³/h

H =90 m

C'est la zone de meilleur fonctionnement hydraulique (BEP : Best Efficiency Point).

Faire fonctionner la pompe près de cette zone permet :

-une meilleure efficacité énergétique,

-moins de vibrations,

-une durée de vie plus longue.

III .6.1.1.2 Puissance absorbée :

Le graphique inférieur montre la puissance consommée :

-La puissance absorbée augmente avec le débit.

-La puissance électrique maximale est d'environ :

P1 ≈ 8.3 kW (puissance absorbée moteur)

P2 ≈ 7.5kW (puissance utile)

Cela signifie que le moteur doit être correctement dimensionné pour supporter cette charge.

III .6.1.1.3 NPSH requis :

La courbe noire inférieure représente le NPSH requis.

Le NPSH augmente avec le débit.

À fort débit, la pompe demande davantage de pression à l'aspiration pour éviter la cavitation.

Remarque :

Le NPSH est la pression minimale nécessaire à l'entrée d'une pompe pour éviter la cavitation. Il existe un NPSH requis par la pompe et un NPSH disponible dans l'installation. Pour un bon fonctionnement, le NPSH disponible doit être supérieur au NPSH requis afin d'éviter les vibrations, les pertes de performance et les dommages de la pompe .

III .6.2 Choix et dimensionnement de la tuyauterie de la pompe Grundfos CR 15-8 :

La station de pompage équipée de la pompe multicellulaire Grundfos CR 15-8 utilise une tuyauterie industrielle en acier PN25. La conduite d'aspiration est dimensionnée en DN80 afin de réduire les pertes de charge et éviter la cavitation, et la conduite de refoulement est également réalisé en DN pour assurer le débit nominal du système . voici le tableau de dimension :

Diamètre nominal (DN)	Diamètre extérieur (De) mm	Épaisseur de paroi mm
DN15 (1/4")	22	2.8
DN20 (3/8")	27	3.2
DN25 (1")	34	3.5
DN32 (1 1/4")	42	3.9
DN40 (1 1/2")	48	4.2
DN50 (2")	60	4.5
DN65 (2 1/2")	76 (ou 73)	4.8
DN80 (3")	89	5.1
DN100 (4")	114	5.5
DN125 (5")	140	6.0
DN150 (6")	168	6.5
...	...	...

Tableau III .3 : Les dimensionnement de la tuyauterie DN

Donc a partir de tableau :

- **DN85 :**
  diamètre extérieur ≈ 89 mm
  épaisseur ≈ 5.1 mm

III .6.3 Réservoir d'eau dessalée (bas):

Un réservoir au sol de m^3 utilisé pour le stockage initial de l'eau dessalée avant le pompage vers le réservoir élevé .



Figure 8 :*Réservoir au sol*

III .6.4 Réservoir d'eau dessalée (haut) :

Le système étudié utilise un réservoir cylindrique métallique 200 m^3destiné au stockage final de l'eau dessalée après le pompage . Il permet de maintenir une pression stable et de distribuer l'eau vers le réseau de la consommation .

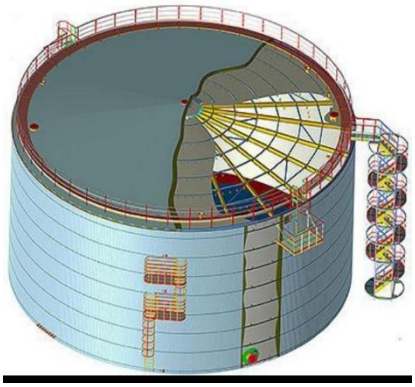


Figure 9 : Réservoir cylindrique



Figure 10:Installation de tuyauterie industrielle acier avec pompe centrifuge

III .6.5 Transmetteur de pression :

Un transmetteur de pression électronique de type 4–20 mA est installé sur la conduite de refoulement afin de mesurer la pression de l'eau dans le système hydraulique. Le signal

mesuré est transmis au régulateur PID qui commande le variateur de vitesse (VFD) pour ajuster automatiquement la vitesse de la pompe selon les besoins de l'installation. Ce dispositif permet d'assurer une pression stable, d'améliorer l'efficacité énergétique du système de pompage et de protéger l'installation contre les variations de pression.

III .6.6 Vanne :

La vanne est un organe de commande installé dans la conduite hydraulique afin de contrôler, ouvrir ou fermer le passage de l'eau dans le système de pompage. Elle permet d'isoler certaines parties de l'installation lors des opérations de maintenance et d'assurer une meilleure gestion du débit d'eau.

III .6.7 Clapet anti-retour :

Le clapet anti-retour est un dispositif de sécurité installé sur la conduite de refoulement pour empêcher le retour de l'eau vers la pompe après l'arrêt du système. Il protège la pompe contre les chocs hydrauliques et garantit l'écoulement de l'eau dans un seul sens.

III .6.8Moteur triphasé de la pompe :

La pompe centrifuge Grundfos CR 15-8 est entraînée par un moteur électrique triphasé de type IEC 132SB alimenté en 3~ 400 V – 50 Hz. Le moteur possède une puissance nominale de 7.5 kW et une vitesse de rotation d'environ 2910 tr/min. Il est utilisé pour assurer le transfert de l'eau dessalée du réservoir inférieur vers le réservoir supérieur avec un fonctionnement stable et un rendement élevé. Le moteur est également compatible avec le variateur de vitesse (VFD), ce qui permet d'optimiser la consommation énergétique et d'améliorer les performances du système de pompage

III .6.9 Les calculs :

Dans cette opération de pompage, plusieurs calculs hydrauliques et électriques sont réalisés afin d'assurer le bon fonctionnement du système et garantir une distribution d'eau stable et efficace. Ces calculs permettent de déterminer :

- D'après le fiche technique :

Données générales :

- Modèle : CR 15-8 A-F-A-E-HQQE
- Type : pompe centrifuge multicellulaire verticale
- Nombre d'étages : 8
- Vitesse nominale : 2910 - 2920 rpm
- Fréquence : 50 Hz
- Alimentation : 3~ 380–415 / 660–690V
- Puissance moteur (P2) : 7.5 kW
- Classe moteur : IE3
- Débit nominale :17 m^3 /h
- Hauteur nominale : 90 m

- Pression équivalente ≃ 9 bar
- Débit max ≃ 22 m^3 / h
- Hauteur max :m 110

III .6.9.1 calculer la vitesse d'eau :

Déterminer la vitesse de l'eau dans la conduite DN80 pour un débit donné 17 m^3 /h

$$\boldsymbol{Q = A \times v}$$

avec :

Q: débit volumique (m/ s)

A : section intérieure du tuyau (m^2)

v : vitesse de l'eau (m/ s)

$$\mathbf{A = \frac{\pi D^2}{4}}$$

Di = De -2 e ⇔ **Di** = 89 − 2 (5.1) = 78.8 mm = **0.0788m**

Le section devient :

$$\mathbf{A = 0.00488 m^2}$$

- **La vitesse d'eau dans le tuyauterie DN80 :**

Conversation du débit nominal :

$$\boldsymbol{Q = \frac{17}{3600} = 0.00472\ m^3/s}$$

Donc :

$$\mathbf{v = \frac{Q}{A} \Leftrightarrow v = 0.97\ m / s}$$

« En respectant la gamme des vitesses (0.5 à 1.5 m/s) »

Pour Débit :

cela repose sur ce qu'on appelle en mécanique des fluides : « la Continuity Equation »

(équation de continuité ou conservation de la masse).

-Cette équation indique que : le débit volumique reste le même en tout point de la conduite .

III .6.9.2 Calcul de hauteur manométrique totale (HMT) :

Pour déterminer la charge totale que la pompe doit fournir pour assurer le transport de l'eau dans le réseau :

$$\boldsymbol{HMT = Hp + Hg + \sum h}$$

III .6.9.3 Calcule de $\boldsymbol{Hp}$ (pression réseau) :

pour vérifier que l'eau est distribuée avec une pression suffisante aux différent points d'utilisation :

- **Conversion de la pression en $\boldsymbol{mCE}$:**

La pression demandé dans le réseau est :

P= 4.5bar

Sachant que :

1 bar ≃ 10 mCE

Alors =

$$Hp = 4.5 \times 10 \iff Hp = \mathbf{45\ mCE}$$

-La hauteur géométrique (Hg) :

Dans cette étude une valeur de :

$$\boldsymbol{Hg = 8\ m}$$

III .6.9.4 Calculs des pertes de charge :

- La formule de Darcy-Weisbach est :

$$\boldsymbol{hf = f \frac{L}{D} \frac{V^2}{2g}}$$

III .6.9.4.1Calcul du coefficient de frottement :

$$f = \frac{0.316}{Re^{0.25}}$$

III .6.9.4.2Calcul du nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{VD}{v}$$

$$Re = \frac{0.97 \times 0.0788}{1 \times 10^{-6}} \simeq 76400$$

« Donc l'écoulement est turbulent »

Alors :

$$\boldsymbol{f \simeq 0.02}$$

Donc :

$$hf = 0.02 \frac{100}{0.0788} \frac{0.97^2}{2\times 9.81}$$

Résultat :

$$\boldsymbol{hf \simeq 1.2mCE}$$

$$\boldsymbol{HMT = 45 + 8 + 1.2}$$

Résultat :

$$\boldsymbol{HMT = 54.2\ m}$$

III .6.9.5 La vérification du point de fonctionnement :

permet de confirmer l'adéquation entre les performances de la pompe et les besoins hydrauliques du réseau.

- Pour un débit de 17 m³/h, la hauteur manométrique totale calculée est d'environ 54.2 mCE.

-D'après les caractéristiques de la pompe Grundfos CR 15-8, celle-ci peut fournir une hauteur d'environ 90 mCE pour ce débit.

$$Hpompe > HMT$$

-La pompe est donc compatible avec le système transfert de l'eau dessalée vers le réseau de stockage et de distribution dans des conditions de fonctionnement stables et avec une marge de sécurité acceptable.

III .6.9.6 Calcul temps de fonctionnement :

$$t = \frac{V}{Q}$$

$$t = \frac{200}{17}$$

$$\boldsymbol{t = 12h}$$

III .6.9.7 Calcul de la puissance hydraulique :

$$Ph = \rho g Q H$$

$$Ph = 1000\times 9.81 \times 0.00472 \times 54.2$$

$$\boldsymbol{Ph = 2511\ W} = \mathbf{2.51\ KW}$$

III .6.9.8 Calcul de la puissance électrique absorbée :

$$Pe = \frac{Ph}{\eta}$$

$$Pe = \frac{2.51}{0.75}$$

$$\boldsymbol{Pe = 3.35\ KW}$$

III .6.9.9 Consommation énergétique sans VFD :

$$\boldsymbol{E_1 = P_1 \times t}$$

$$E_1 = 7.5 \times 12$$

$$\boldsymbol{E_1 = 90\ kWh}$$

A. Partie VFD :

Les calculs liés au (VFD) sont réalisés afin d'évaluer son impact sur la vitesse de la pompe :

III .6.9.10 Calcul de nouvelle fréquence avec le VFD :

D'après lois d'affinité de hauteur manométrique est :

$$\boldsymbol{(H_2)/(H_1) = (N_2/N_1)^2}$$

$$N_2 = N_1 \times \sqrt{\frac{H_2}{H_1}}$$

$$\boldsymbol{N_2 = 50 \times \sqrt{\frac{54.2}{90}}}$$

$$\boldsymbol{N_2 \simeq 39\ H_Z}$$

III .6.9.11 Calcul de nouvelle puissance après variation de fréquence :

- D'après lois d'affinité :

$$\boldsymbol{P_2 = P_1 \times (N_2/N_1)^3}$$

$$\boldsymbol{P_2 = 7.5 \times (39 / 50)^3}$$

$$\boldsymbol{P_2 = 3.56\ KW}$$

III .6.9.12 Calcul de nouvelle débit après VFD :

$$Q_2 = Q_1 \times (N_2/N_1)$$

$$Q_2 = 17 \times (39/ 50)$$

$$\boldsymbol{Q_2 = 13.26\ m^3 / h}$$

III .6.9.13 Calcul temps de fonctionnement :

$$\boldsymbol{t = \frac{v}{\varphi}}$$

$$\boldsymbol{t \simeq 15\ h}$$

III .6.9.14 Calcul consommation d'énergie avec VFD :

$$\boldsymbol{E_2 = P_2 \times t}$$

$$E_2 = 3.56 \times 15$$

$$\boldsymbol{E_2 = 53.4\ KWh}$$

III .6.9.15 Gain énergétique (économie d'énergie) :

Gain = $E_1 - E_2$

Gain ≃ **36.6 $\boldsymbol{KWh}$**

III .6.9.16 Pourcentage économie d'énergie :

$$\frac{\boldsymbol{E_1 - E_2}}{\boldsymbol{E_1}}$$

$$\frac{\mathbf{90-53.4}}{\mathbf{90}} = \mathbf{40.6\%}$$

III .6.9.17 La vitesse avec VFD :

D'après loi de proportionnalité entre la vitesse et la fréquence :

$$N_2 = N_2 \times \frac{f_2}{f_1}$$

$$N_2 = 2910 \times \frac{39}{50}$$

$$N_2 = 2269\ rpm$$

B. Partie PID :

III .6.9.18 Calcul erreur :

$$e\ (t)\ =\ SP\ -\ PV$$

SP : pression de consigne

PV : pression mesurée

Calcul pression mesurée :

- Un capteur de pression : 0 – 10 bar
- Une sortie : 4 – 20 mA
- Un courant mesuré : 10 mA

$$PV = \frac{(I - 4)}{16} \times P_{max}$$

$$PV = 3.75 \text{ bar}$$

Donc résultat :

$e\ (t)\ = 4.5 - 3.75$

$e\ (t) = \ 0.75$

L'erreur obtenue est égale à 0.75 bar, ce qui signifie que la pression mesurée est inférieure à la pression de consigne. Le régulateur PID agit alors sur le variateur de vitesse afin d'augmenter la vitesse de la pompe et rétablir la pression demandée.

III .6.10 Analyse des résultats :

Grandeur	Sans VFD	Avec VFD	Réduction	
Fréquence	50 Hz	36 Hz	-22%	
Vitesse	2910 rpm	2269rmp	-22%	
Débit	17 m^3/h	13.26 $m^3\ /\ h$	-22%	
Puissance	7.5 kw	3.56 kw	-52.5%	
Durée	12h	15h	$+25\%$	
Énergie	90 Kwh	53.4 Kwh	-40.6%	

Tableau III.4 : Analyse des résultats

III .7 La réponse du système et régulation de pression :

La réponse du système de pompage dépend de l'action du régulateur PID associé au variateur de vitesse. Lorsqu'une variation de pression apparaît dans le réseau hydraulique, le capteur de pression mesure la nouvelle valeur et transmet l'information au régulateur PID. Celui-ci compare la pression mesurée à la pression de consigne fixée à 4.5 bar puis ajuste automatiquement la fréquence du variateur afin de modifier la vitesse de rotation de la pompe centrifuge multicellulaire. Cette régulation permet d'obtenir une réponse rapide et stable du système, tout en évitant les oscillations et les variations brusques de pression. Grâce à cette stratégie de contrôle, la stabilité hydraulique est améliorée, la pression est maintenue constante et la consommation énergétique du système de pompage est réduite.

III .8 Schéma câblage :

Ce schéma présente l'architecture électrique d'une station de pompage équipée d'un variateur de vitesse (VFD). Le circuit de puissance comprend l'alimentation triphasée, le disjoncteur magnétothermique (Q1), le contacteur de puissance (KM1), le variateur de vitesse et le moteur asynchrone. Le circuit de commande assure les fonctions Marche/Arrêt, Réarmement et la régulation de pression à l'aide d'un transmetteur de pression (4–20 mA) connecté à l'entrée analogique du variateur. Cette configuration permet d'adapter la vitesse du moteur aux besoins du réseau et d'améliorer l'efficacité énergétique du système de pompage.

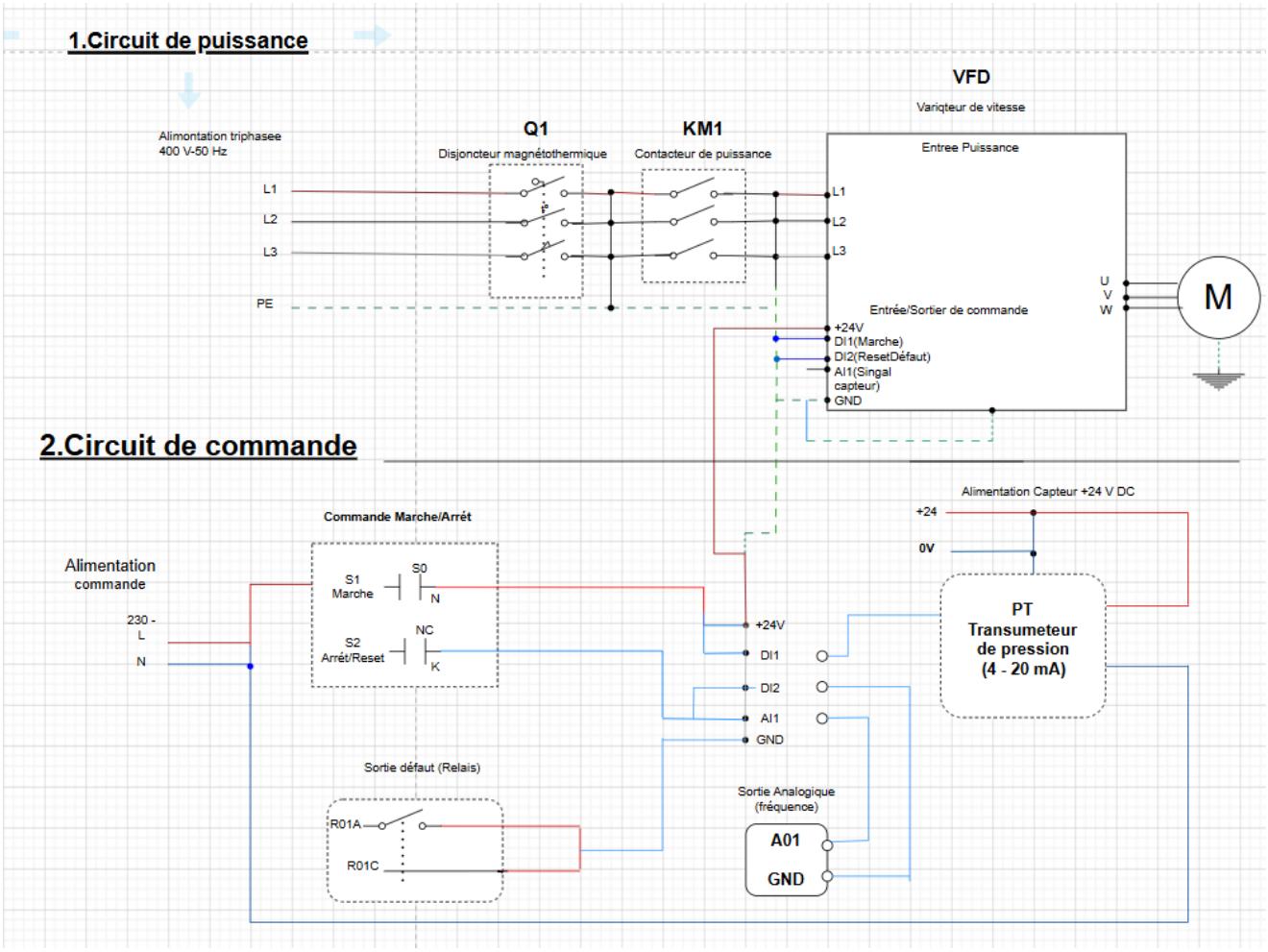


Figure 13 :Schéma électrique de la station de pompage

Chapitre IV :

Résultats et essaies

IV .1 Introduction :

Ce projet consiste à concevoir une boucle de régulation de pression pour une station de pompage sous TIA Portal V17. Le système utilise un automate S7-1200, un variateur de fréquence (VFD) et une interface de supervision WinCC.

Ce travail permet de mettre en évidence l'importance de l'automatisation industrielle dans l'amélioration de la performance, de la sécurité et de la stabilité des systèmes de pompage.

IV .2 TIA PORTAL (Totally Integrated Automation Portal) :

Le logiciel d'automatisation industrielle TIA Portal (Totally Integrated Automation Portal) a été conçu par Siemens. Il comprend un environnement de programmation graphique (SIMATIC STEP 7) pour la programmation des automates programmables, un outil de configuration des périphériques (SIMATIC WinCC) pour l'interface opérateur, un système de gestion de projet pour structurer les projets d'automatisation, et d'autres fonctionnalités comme la simulation et le débogage qui facilitent une mise en service plus rapide et diminuent les temps d'arrêt. Cela entraîne finalement une augmentation de la productivité et une amélioration de la rentabilité.



Figure 1 : logiciel de programmation TIA PORTAL V17.

Ainsi, une mise en service rapide avec une localisation efficace des erreurs, ainsi qu'une maintenance et un diagnostic à distance faciles avec un serveur Web et un téléservice. L'objectif principal de TIA Portal est de simplifier le processus de développement des systèmes d'automatisation en fournissant une interface unifiée et des outils intégrés. TIA Portal permet d'intégrer tous les composants clés de notre projet d'automatisation, y compris la sûreté, la sécurité, le contrôle, l'IHM, les entraînements, les périphériques décentralisés, le contrôle de mouvement et la distribution d'alimentation Le logiciel dispose d'une bibliothèque complète de blocs fonctionnels prédéfinis et de modules standardisés qui peuvent être facilement intégrés dans un projet.

En résumé, TIA PORTAL est une suite logicielle puissante et polyvalente qui peut nous aider à rationaliser le processus de programmation de l'API S7-300 et d'autres automates Siemens. Avec son architecture évolutive, son interface utilisateur intuitive, ses bibliothèques étendues et son intégration transparente avec d'autres progiciels, TIA PORTAL est l'outil ultime pour notre projet

IV .3 Notre programme :

IV .3.1 Création du projet dans TIA Portal V17:

Afin de créer un nouveau projet dans le logiciel TIA Portal V17(Totally Integrated Automation Portal), développé par Siemens, qui permet la programmation et la configuration des automates programmables industriels (API), des interfaces homme-machine (IHM) et d'autres équipements d'automatisation, nous utilisant « l'assistant de création de projet », en cliquant sur « créer un projet » ce qui nous permet de commencer la configuration, cette méthode nous permet de gérer notre projet aisément. En sélectionnant l'icône « créer un projet », on affiche la fenêtre principale, on remplit le vide de notre fenêtre et on appuie sur le bouton « créer », la figure I.2 représente la mise en route de notre projet

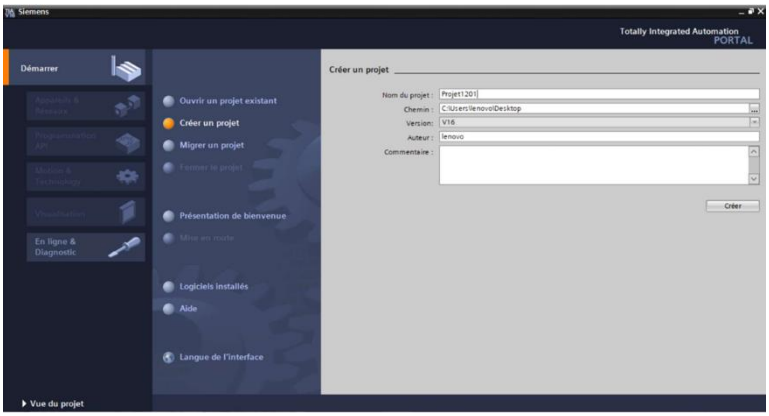


Figure 2: création du projet.

On passe à la deuxième étape en cliquant sur le bouton « appareils et réseaux » ce qui nous permet de choisir les appareils qui constitueront notre système. Nous devrons choisir un type d'automate PLC (Programmable Logic Controller) et une interface homme machine IHM.

IV .3.2 Configuration et paramétrage du matériel :

Une fois le projet crée, on peut configurer la station de travail. La première étape consiste à définir le matériel existant. Pour cela, on peut passer par la vue du projet et cliquer sur « ajouter un appareil » dans le navigateur du projet.

La liste des éléments que l'on peut ajouter apparait (API, IHM, système PC). On commencera par faire le choix de notre CPU.

a) Choix de l'API :

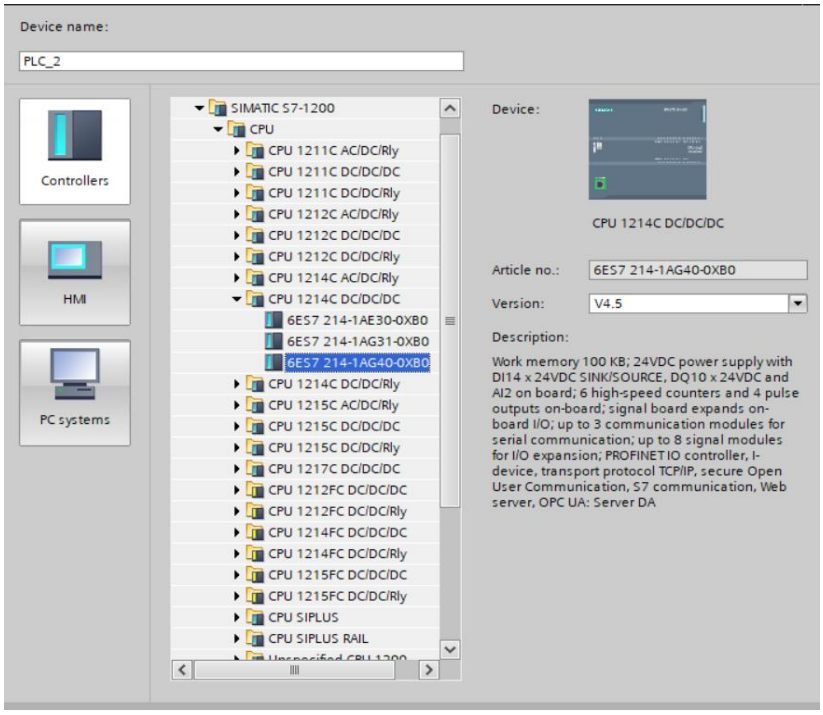


Figure 3 : Choix de l'API.

Nom d' API	CPU 1214C DC /DC/DC
Numéro d' article	6ES7 214-1AG40-0XB0
Version	4.5
Mémoire de travail	100 KB
Interface de communication	2 ports PROFINET (PROFINAT IO, TCP/IP; S7 communication ,OPC UA)

Tableau IV.1 Caractéristiques techniques du CPU.

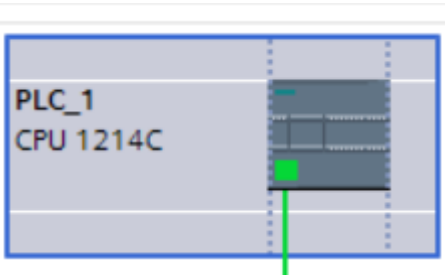


Figure 4: La configuration de l'API.

b) Les PLC tags :

Dans TIA Portal, toutes les PLC tags (entrées, sorties, mémentos,) possèdent une adresse symbolique et une adresse absolue**.**

- L'adresse absolue : représente l'identificateur d'opérande (I, Q, M,) et son adresse et numéro de bit.
- L'adresse symbolique : correspond au nom que l'utilisateur a donné à la variable. Le lien entre les adresses symboliques et absolues se fait dans la table des variables API.

Lors de la programmation, on peut choisir d'afficher les adresses absolues, symboliques ou encore les deux simultanément. On peut également insérer un commentaire qui nous renseigne sur cette variable. Le commentaire peut être visible dans chaque réseau utilisant cette variable.

PLC tags

	Name	Tag table	Data type	Address	Retain	Acces...	Writa...	Visibl...
6	Marche_Pompe	Variable_PID	Bool	%M0.2	☐	☑	☑	☑
7	Speed_Normalisee	Variable_PID	Real	%MD22	☐	☑	☑	☑
8	Start_PB	Variable_PID	Bool	%I0.0	☐	☑	☑	☑
9	Stop_PB	Variable_PID	Bool	%I0.2	☐	☑	☑	☑
10	Marche_Pompe(1)	Default tag table	Bool	%M0.0	☐	☑	☑	☑
11	Pompe	Variable_PID	Bool	%Q0.1	☐	☑	☑	☑
12	Pression_Reelle(1)	Tag table_1	Real	%MD20	☐	☑	☑	☑
13	consigne(1)	Tag table_1	Real	%MD24	☐	☑	☑	☑
14	PID_Output(1)	Tag table_1	Real	%MD28	☐	☑	☑	☑
15	VFD_Output(1)	Tag table_1	Int	%QW66	☐	☑	☑	☑
16	Defaut_VFD	Tag table_1	Bool	%I0.1	☐	☑	☑	☑
17	Pompe_ON	Tag table_1	Bool	%Q0.0	☐	☑	☑	☐
18	Niveau_Reservoir1	Default tag table	Real	%MD32	☐	☑	☑	☑
19	PLC_Status	Default tag table	Bool	%M0.1	☐	☑	☑	☑
20	VFD_Speed_PV	Default tag table	Real	%MD36	☐	☑	☑	☑
21	Niveau_Reservoir2	Default tag table	Real	%MD40	☐	☑	☑	☑
22	Sim_bar1	Default tag table	Real	%MD44	☐	☑	☑	☑
23	Sim_bar1(1)	Default tag table	Real	%MD48	☐	☑	☑	☑

Figure 5 :PLC tags

IV .3.3 Blocs de programme (Le bloc main OB1) :

a) Bloc *PID_Compact*

Ce réseau met en œuvre la régulation PID de pression. Le bloc *PID_Compact* (instancié dans le DB3 appelé "*PID_Pression*") est activé uniquement lorsque le bit %M0.2 "*Marche_Pompe*" est à 1, ce qui signifie que le PID ne fonctionne que si la pompe est en marche. La consigne de pression est fournie par la variable %MD14 "Consigne", et la mesure réelle de pression provient de %MD10 "Pression_Reelle". La sortie du régulateur est stockée dans %MD18 "PID_Output", qui représente la fréquence calculée à envoyer au variateur. Les sorties Error et ErrorBits permettent de surveiller les éventuels défauts du bloc PID.

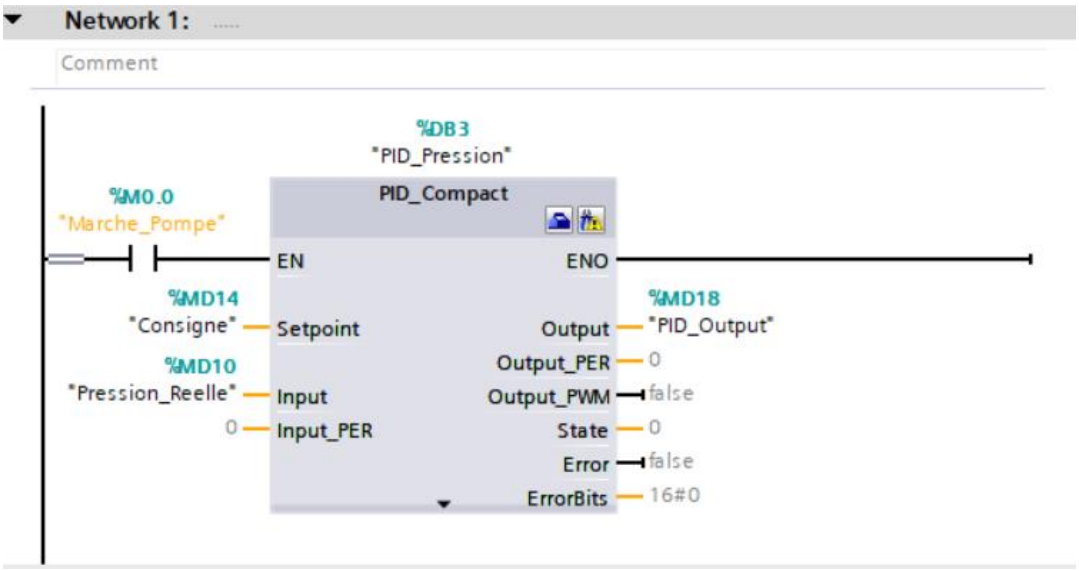


Figure 6 : Bloc *PID_Compact*

b) Bloc : NORM_X (Int → Real):

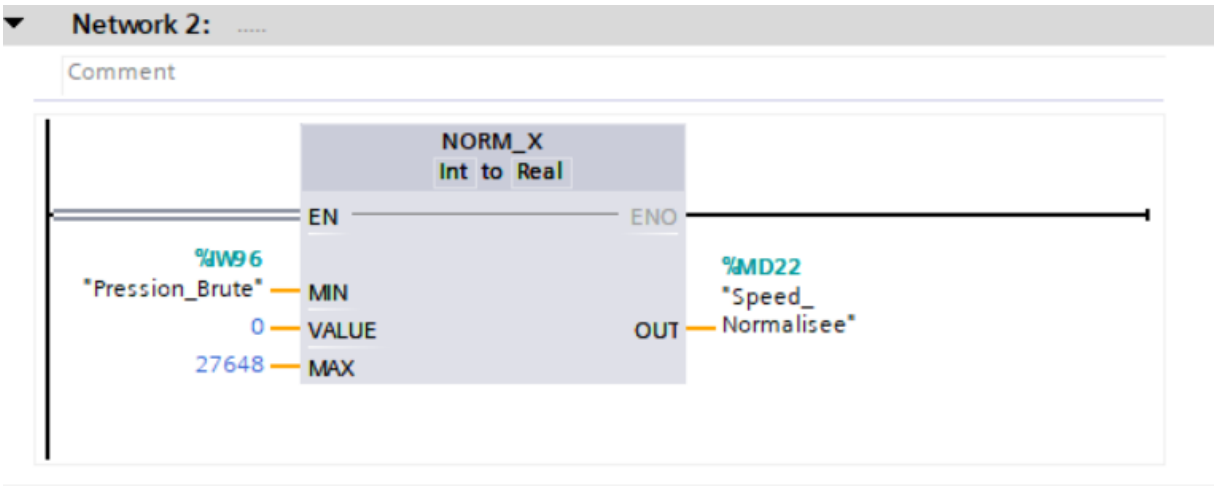


Figure 7 : Normalisation de la pression brute

Ce réseau utilise le bloc NORM_X en mode Int vers Real pour convertir la valeur brute du capteur de pression analogique %IW96 "*Pression_Brute*" en une valeur normalisée comprise entre 0.0 et 1.0. La valeur brute varie de 0 à 27648, ce qui correspond à la plage standard des entrées analogiques du S7-1200. Le résultat normalisé est stocké dans %MD22 "Speed_Normalisee" et sera utilisé dans le réseau suivant pour obtenir la pression en bar.

c) **Bloc :SCALE_X (Real → Int) :**

Ce réseau utilise un bloc SCALE_X en mode Real vers Real pour transformer la valeur normalisée %MD22 "*Speed_Normalisee*" (entre 0.0 et 1.0) en une pression exprimée en bar, avec un maximum de 16.0 bar. Le résultat est écrit dans %MD10 **"*Pression_Reelle*", qui**

sert de valeur de retour (feedback) pour le bloc PID du réseau 1. C'est donc ce réseau qui ferme la boucle de régulation.

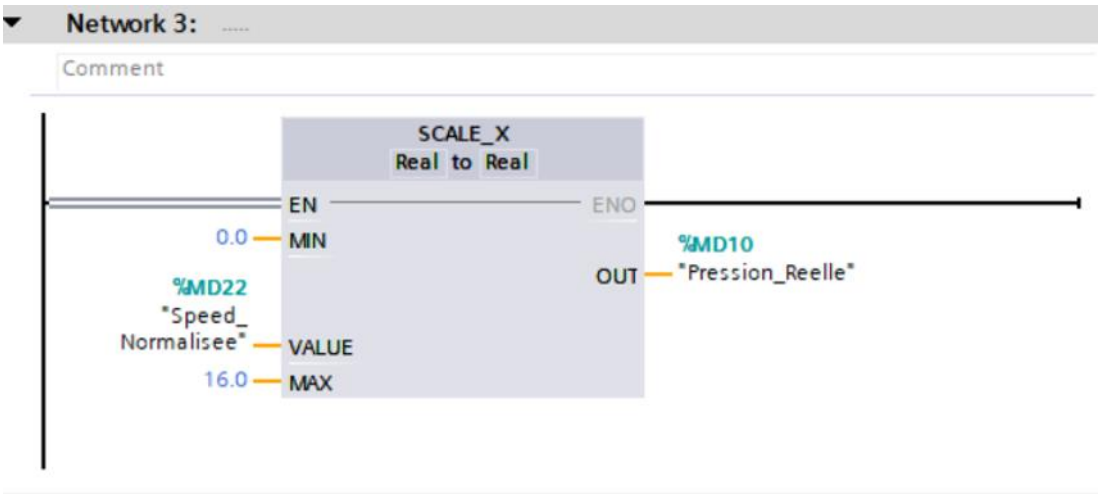


Figure 8 : Conversion de la valeur normalisée en pression réelle

d) 2 blocs en cascade :

Ce réseau contient deux blocs en cascade pour convertir la sortie du PID en une commande exploitable par le variateur de fréquence. Le premier bloc NORM_X normalise la valeur %MD18 "*PID_Output*" de sa plage 0.0 à 50.0 Hz vers une valeur entre 0.0 et 1.0, stockée dans %MD22. Ensuite, le bloc SCALE_X remet cette valeur à l'échelle entre 0 et 27648 pour produire %QW68 "VFD_Output", qui est la sortie analogique physique envoyée au variateur de fréquence pour contrôler la vitesse de la pompe.

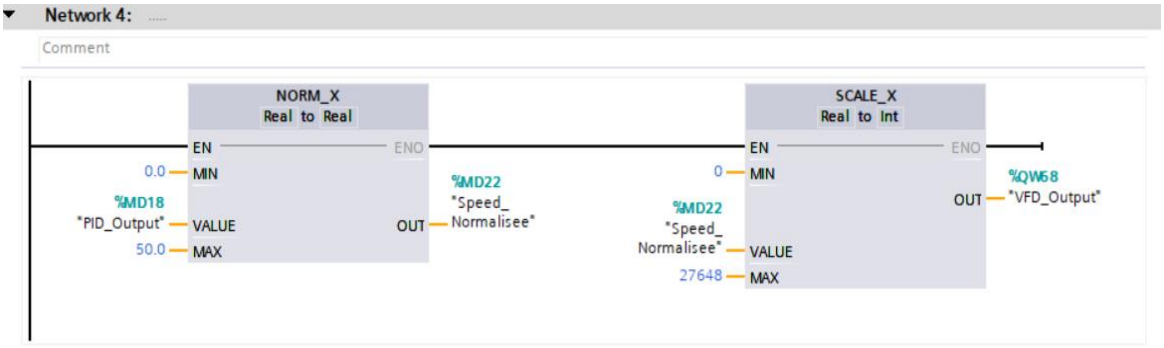


Figure 9 :Mise à l'échelle de la sortie PID vers le variateur

La Bascule SR (Set/Reset) :

La bascule SR est un mécanisme de mémorisation qui permet de conserver un état même après la disparition du signal qui l'a provoqué. Elle fonctionne avec deux entrées : S (Set) qui met la sortie à 1, et R (Reset) qui remet la sortie à 0.

Dans ce programme, la bascule n'est pas un bloc SR explicite mais elle est réalisée par le circuit $d'auto - maintien$ du réseau 1 (Image 6). Lorsque l'opérateur appuie sur Start (%I0.0), le bit %M0.2 "$Marche_Pompe$" passe à 1. Son propre contact en parallèle prend le relais et maintient la bobine alimentée même après le relâchement du bouton Start. C'est la fonction Set. Lorsque l'opérateur appuie sur Stop (%I0.2), le contact normalement fermé s'ouvre, la bobine tombe et %M0.2 revient à 0. C'est la fonction Reset. Ce principe est fondamental en automatisme car il permet à la machine de rester dans un état stable (marche ou arrêt) sans que l'opérateur ait besoin de maintenir le bouton appuyé en permanence.

d) Logique de démarrage et d'arrêt de la pompe :



Figure10 : Démarrage/Arrêt pompe

Ce réseau implémente un circuit classique de démarrage avec $auto - maintien$. Lorsque l'opérateur appuie sur le bouton Start (%I0.0 "$Start_PB$"), le bit %M0.2 "$Marche_Pompe$" est activé et se maintient grâce à son propre contact en parallèle. Le bouton Stop (%I0.2 "Stop_PB") est câblé en contact normalement fermé, ce qui signifie qu'en appuyant dessus on coupe l'alimentation de la bobine et la pompe s'arrête. Ce bit %M0.2 conditionne ensuite à la fois le démarrage du PID et la commande physique de la pompe.

e) Commande de la sortie physique de la pompe :

Le réseau 6 montre la commande directe de la sortie physique de la pompe. Lorsque le bit interne %M0.2 "$Marche_Pompe$" est actif, la sortie %Q0.1 "Pompe" est mise à 1, ce qui alimente le contacteur ou le relais de la pompe. C'est la traduction physique de l'ordre de marche interne vers le terrain.

Figure 11:Commande de la sortie de la pompe



IV .4 Supervision :

Dans tout système automatisé, la supervision joue un rôle crucial, et TIA Portal ne fait pas exception. Dans le logiciel TIA Portal, la supervision désigne la capacité à concevoir des interfaces graphiques facilement utilisables pour la supervision et le contrôle de systèmes automatisés.

IV.4.1. Logiciel du développement d'un système de supervision :

Dans TIA Portal, la supervision des installations industrielles est assurée par le module logiciel WinCC. Ce dernier permet de concevoir des interfaces graphiques conviviales, de collecter des données en temps réel, de gérer les alarmes et de visualiser l'état des processus industriels. La version V17 de WinCC constitue une évolution importante, intégrant de nouvelles fonctionnalités, des améliorations significatives ainsi que divers correctifs par rapport aux versions antérieures. En somme, l'intégration de WinCC dans TIA Portal joue un rôle crucial dans l'optimisation de la production. Elle permet une surveillance en temps réel des processus, favorise une détection rapide des anomalies, et facilite la mise en œuvre de mesures correctives avant que les incidents ne s'aggravent. Par ailleurs, cette supervision globale du système contribue à réduire les temps de formation des opérateurs, tout en simplifiant le diagnostic et la résolution des problèmes.

IV .4.2 La configuration de la communication :

a) Choix du système de supervision :

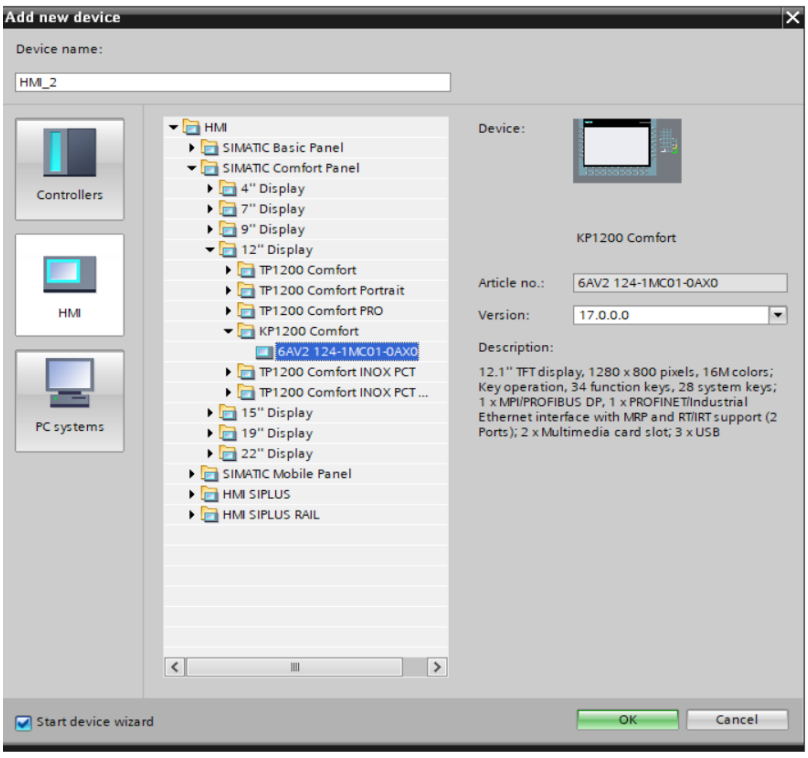


Figure 12: Choix de l'écran de supervision.

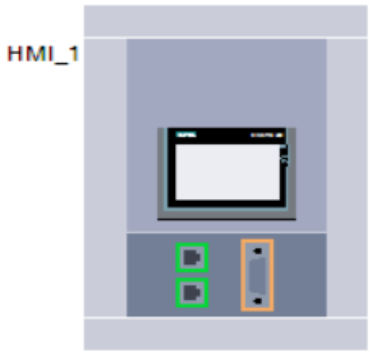


Figure 13: Configuration matérielle SCADA.

b) La vue réseau :

Le protocole de communication *Profinet* est utilisé pour l'automate et l'IHM.

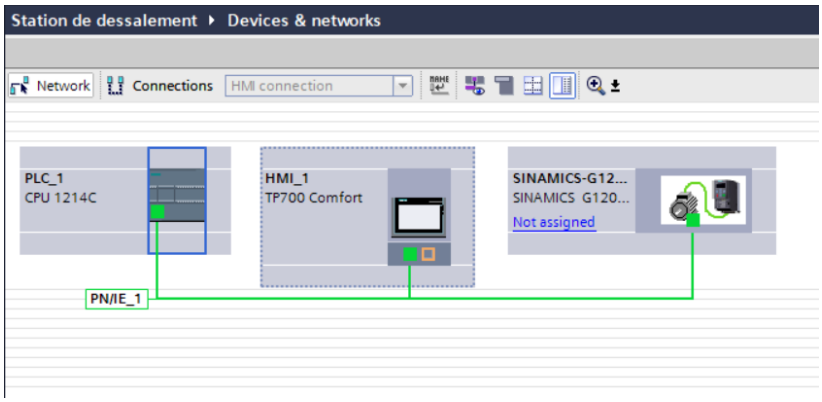


Figure IV: La vue réseau des appareils utilisés dans notre projet.

c) Table des variable PID :

A partir « d'Arborescence du projet » : appuyer sur notre IHM (HMI TP 1200 Confort) ensuite « Variables PID », enfin sur « Table de variables standard ».

riable_PID

Name	Data type	Address	Retain	Acces...	Writa...	Visibl...
Pression_Brute	Int	%IW96	☐	☑	☑	☑
Pression_Reelle	Real	%MD10	☐	☑	☑	☑
Consigne	Real	%MD14	☐	☑	☑	☑
PID_Output	Real	%MD18	☐	☑	☑	☑
VFD_Output	Int	%QW68	☐	☑	☑	☑
Marche_Pompe	Bool	%M0.2	☐	☑	☑	☑
Speed_Normalisee	Real	%MD22	☐	☑	☑	☑
Start_PB	Bool	%I0.0	☐	☑	☑	☑
Stop_PB	Bool	%I0.2	☐	☑	☑	☑
Pompe	Bool	%Q0.1	☐	☑	☑	☑

Figure 14:Table de variables stand

Lorsque notre HMI est sélectionné dans le navigateur du projet et que « démarrer la simulation » est choisi, WINCC se lance automatiquement et la vue rayée apparaît.

IV.4.3 Les vues programmées dans l'IHM :

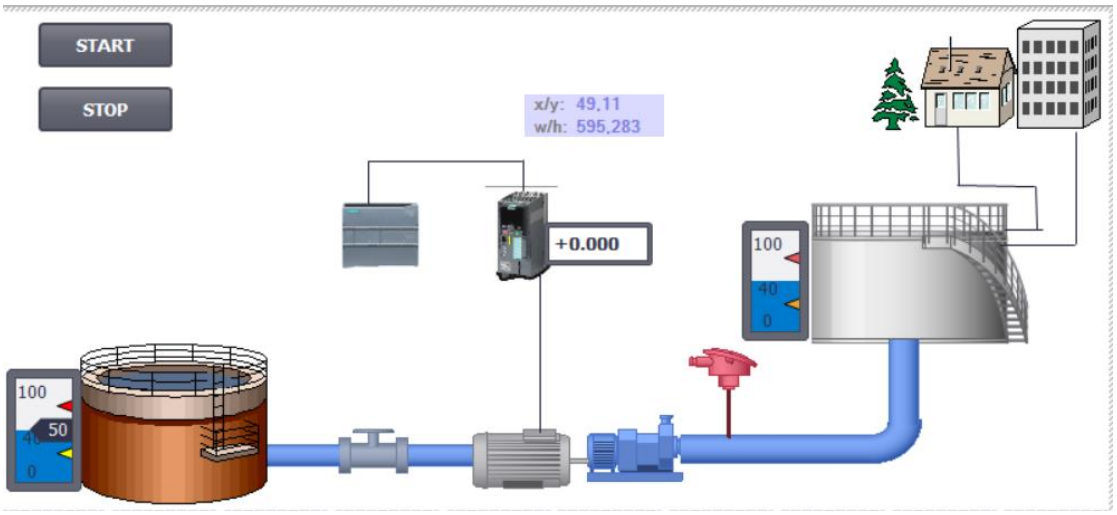


Figure 15: Vue de station de dessalement

- **Simulation :**

Nous avons employé les applications suivantes pour simuler le programme suggéré : STEP7, WinCC et PLCSIM pour la supervision, le contrôle et la création des défauts respectivement.

Pour lancer notre programme, on sélectionne notre API dans l'outil de navigation du projet, puis on clique sur « démarrer la simulation ».

La phrase ci-dessous apparaîtra comme PLCSIM commence : On appuie sur « lancer la recherche », puis sur « Charger ».

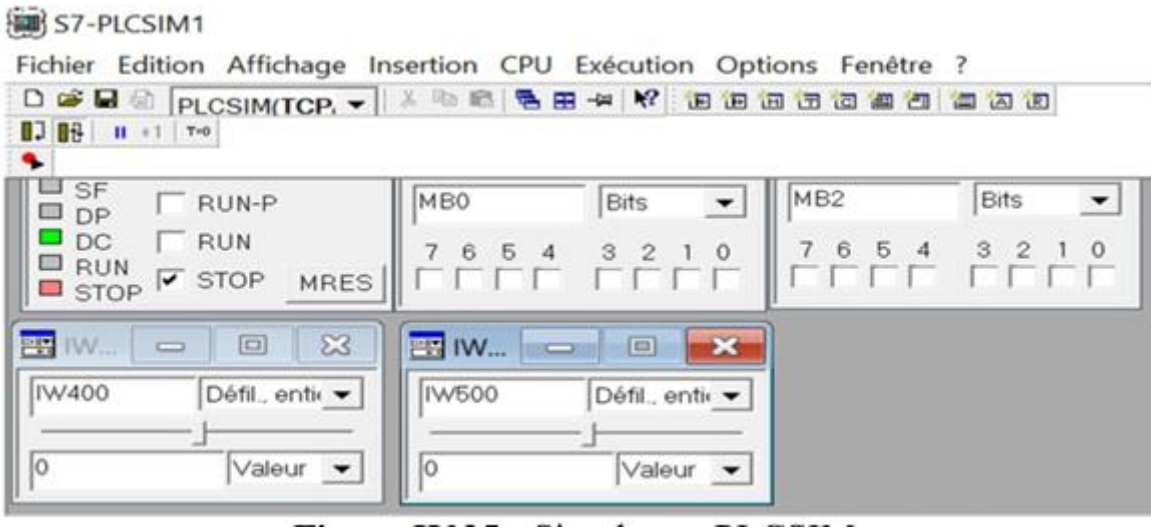


Figure 16: Simulateur PLCSIM.

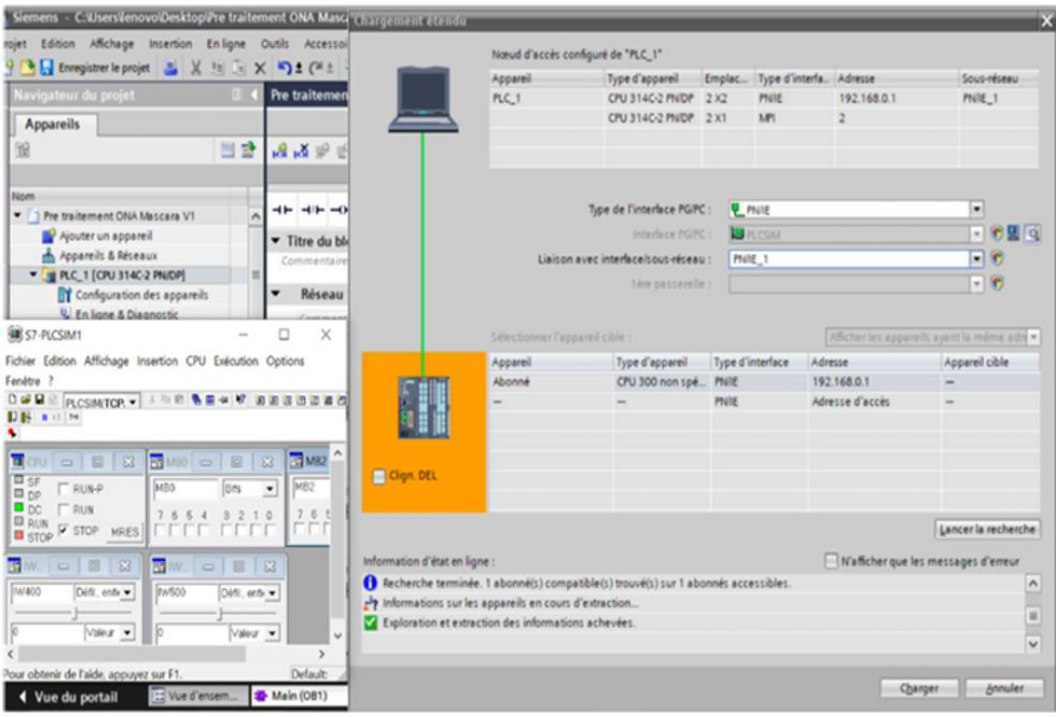


Figure 14: La liaison de PLCSIM avec le CPU

Dans le cadre de cette étude, la simulation du système de régulation a été réalisée à l'aide de l'outil PLCSIM intégré dans TIA Portal. Cet environnement permet d'émuler le fonctionnement d'un automate programmable (PLC) sans recours à un matériel physique, ce qui facilite le test et la validation de l'algorithme PID.

Après le chargement du programme dans le PLC virtuel, le système est mis en mode RUN afin de simuler le comportement réel de la boucle de régulation. Le régulateur PID traite la

valeur de consigne ($Setpoint$) et la variable de procédé (Process Variable), puis génère une sortie de commande permettant d'ajuster la vitesse de la pompe via le variateur de vitesse (VFD).

Durant la simulation, les différentes variables du système sont surveillées en temps réel, notamment la pression, l'erreur de régulation et le signal de commande. Ces données permettent de tracer les courbes de réponse du système, ce qui facilite l'analyse des performances dynamiques telles que le temps de réponse, le dépassement et la stabilité.

Ainsi, l'utilisation de PLCSIM a permis de valider le comportement du régulateur PID dans un environnement virtuel fiable, avant toute implémentation réelle sur une installation physique.

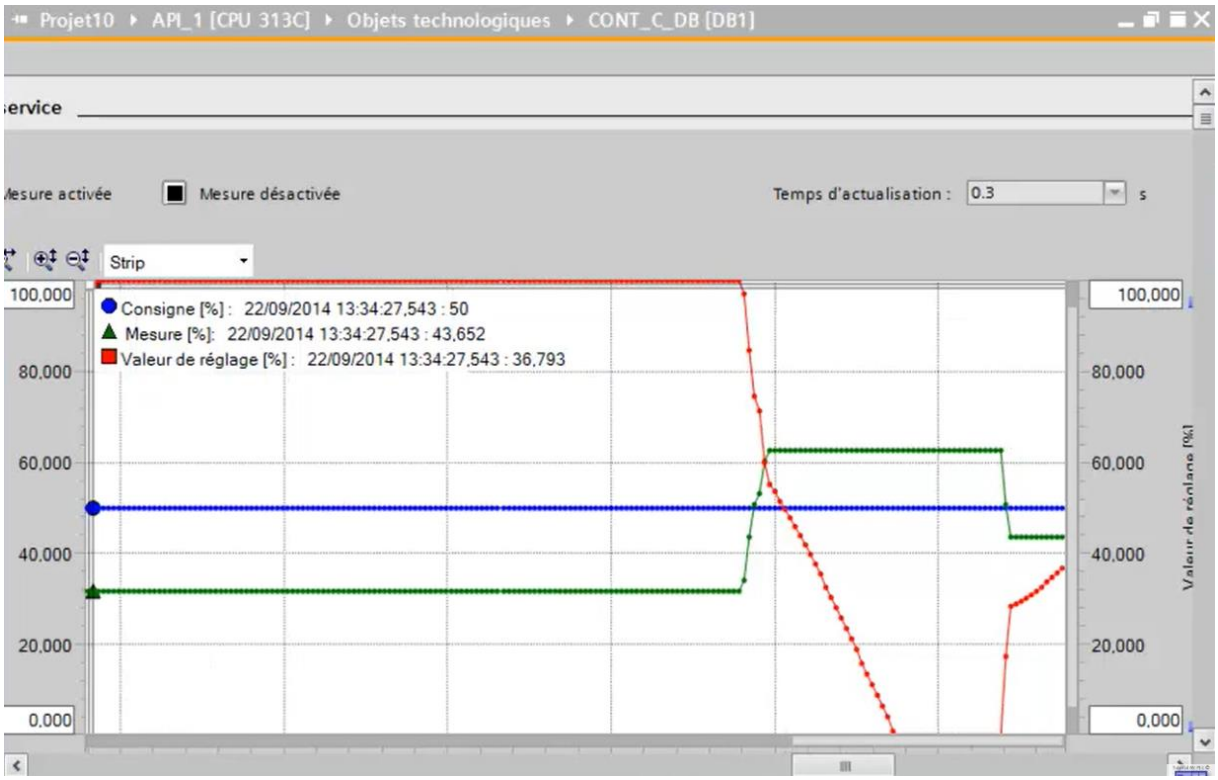


Figure 19: courbe de réponse du régulateur PID sous TIA PORTAL

IV .5 CONCLUSION :

En conclusion, ce projet a permis de mettre en œuvre une solution complète d'automatisation d'une station de pompage basée sur TIA Portal V17. L'association entre l'automate S7-1200, le régulateur PID et le variateur de vitesse assure un contrôle efficace, stable et précis de la pression.

L'intégration de la supervision via WinCC améliore la visualisation des données, la gestion des alarmes et le suivi du procédé en temps réel. Cette architecture basée sur PROFINET offre également une grande flexibilité et une évolutivité importante.

Enfin, ce système peut être amélioré dans des travaux futurs par l'optimisation énergétique, l'ajout de nouvelles boucles de contrôle ou encore l'intégration de protocoles industriels avancés tels que OPC UA.

Conclusion Générale :

Conclusion Générale :

Ce travail a permis d'étudier et de proposer une solution de modernisation d'une station de pompage hydraulique basée sur l'intégration d'un variateur de fréquence (VFD) associé à une régulation PID afin d'améliorer les performances énergétiques et opérationnelles du système.

L'étude réalisée a mis en évidence l'importance de l'adaptation de la vitesse du moteur aux besoins réels du réseau hydraulique. Les calculs effectués dans le cadre de cette étude ont permis de déterminer les principaux paramètres de fonctionnement de la station, notamment le débit, la hauteur manométrique totale, les pertes de charge ainsi que les puissances hydraulique et électrique nécessaires au fonctionnement du système.

Les résultats obtenus montrent que l'utilisation d'un variateur de fréquence constitue une solution efficace pour réduire les pertes énergétiques liées au fonctionnement à vitesse constante. En ajustant la vitesse de rotation du moteur en fonction de la demande réelle, il devient possible d'optimiser la consommation d'énergie tout en maintenant les performances hydrauliques requises.

Par ailleurs, l'intégration d'un régulateur PID a permis d'améliorer la qualité de régulation de la pression et du débit. Les essais de simulation ont montré une diminution de l'erreur de régulation, une meilleure stabilité du système et une réponse plus rapide face aux variations des conditions de fonctionnement. Cette stratégie de commande contribue également à réduire les sollicitations mécaniques des équipements et à augmenter leur durée de vie.

La mise en œuvre de cette solution sous TIA Portal a permis de valider le principe de commande proposé et de démontrer la faisabilité d'un système de pompage automatisé, performant et économe en énergie. Les résultats obtenus confirment que l'association VFD–PID représente une solution adaptée aux exigences actuelles d'efficacité énergétique, de fiabilité et de continuité de service dans les installations de pompage industrielles.

Ainsi, cette étude démontre que l'intégration des technologies modernes de commande et de régulation constitue une voie prometteuse pour l'amélioration des performances des stations de pompage et la réduction de leur consommation énergétique.

Références bibliographiques :

[1] Maurel A. (2006) « Dessalement de l'eau de mer et des eaux saumâtres », 2ème Ed. Tec&Doc Lavoisier.

[2] MANUEL D'exploitation et d'entretien, « Usine de dessalement de Mostaganem » (02/02/2011).

[3] AMMOUR. Lamia, « Mémoire Station de dessalement Mostaganem » (2014 -2015).

[4] MANSOUR, Hend, 2017. Etude et dimensionnement d'une station de pompage d'eau brute à fonctionnement automatique. Projet de fin d'études : Génie énergétique et technologies de l'environnement. Gafsa : École Nationale d'Ingénieurs de Gafsa.

[5] BENHASSIR, Fawaz, 2020. Entraînement des pompes centrifuges à vitesse variable pour réduire la consommation d'énergie. Mémoire de Master : Électromécanique. Annaba : Université Badji Mokhtar.

[6] Arab, A., & Atig, M. Dimensionnement d'un moteur asynchrone triphasé à cage d'écureuil. Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou.

[7] https://www.debem.com/fr/courbe-caracteristique-dune-pompe-centrifuge/

[8] Limare Charlotte, « Efficacité énergétique », Advizeo,:

https://www.advizeo.io/energy-management/efficacite-energetique-ce-quil-faut-savoir/

[9] KSB.Lefficacité des moteurs ;12 avr .2024 :

https://www.ksb.com/fr-fr/magazine/histoires-d-optimisation/l-efficacite-des-moteurs-fait-toute-la-difference

[10] BOUACH, Ahcene et BENMAMAR, Saadia. Optimisation énergétique d'un système de pompage : Application à la station de Rassauta. Revue scientifique et technique - LJEE. Juin-Décembre 2017. N° 30 & 31.

[11] Grundfos. (s. d.). Manuel sur les pompes. Motralec.

https://www.motralec.com/public/fichiers/docs/Grundfos-FORMATION-POMPES.pdf

[12] Bekradda, C., & Bennaceur,Etude de maintenance et fiabilité des pompes centrifuges [Mémoire de Master, Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed].

[13] ABB. Relever les défis de l'efficacité énergétique dans le secteur de l'eau et des eaux usées [en ligne]. Livre blanc. S. l. : ABB, [s. d.]

[14] Global Sources. (2025, 3 novembre). Systèmes de contrôle de puissance : optimisation de l'efficacité et des performances.

[15] Aguirre, A. (2023, 31 juillet). Variateur de fréquence. Glossaire des termes HVAC, Area Cooling Solutions.

[16] Hangzhou KUVO Electronics Co., Ltd.. (20 October 2025). Building 5, 2nd Floor Bao Yi Technology Park 1-1 Lingan Road Renhe Subdistrict Yuhang District Hangzhou, Zhejiang https://hzkuvo.com/fr/connaissances/quest-ce-quun-vfd-et-comment-fonctionne-t-il/

[17] BRASSIER, Maxime. La régulation PID pour les nuls. In : Fuji Electric France

[18] Segundo-Ormachea, C., Walter, L., Mego, U., Herrera-Levano, J., & Coaquira-Castillo, R. (2024). Design and Implementation of a Water Level Controller in Pumping Chamber which is Part of a Wastewater Treatment Plant.

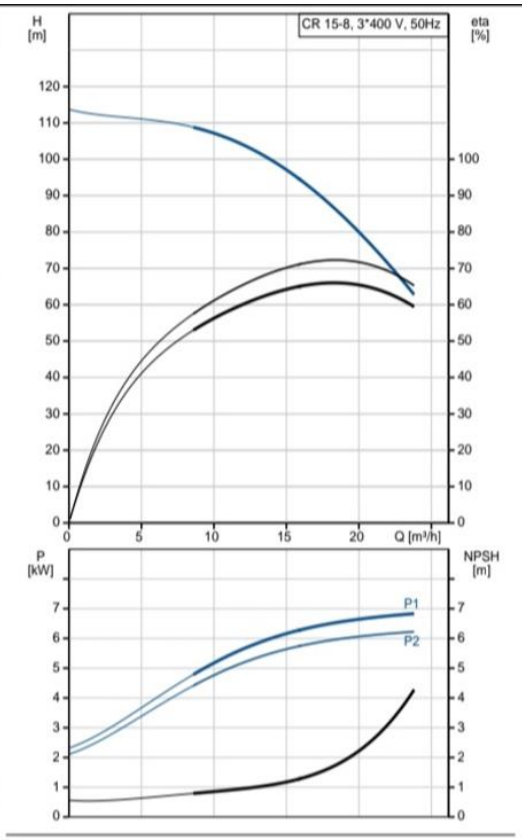
[19] Saputra, Dede Irawan, et al. "Cascade PID Control Loop Implementation For Liquid Tank Level in LabVIEW PC-Based Control Using Arduino Mega as Data Acquisition." *2022 ;*

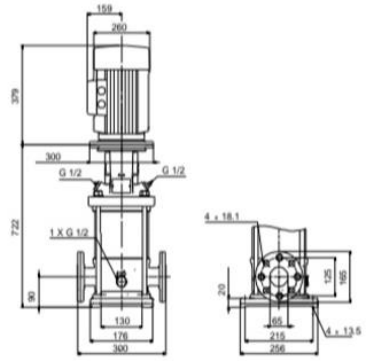
[20] Bosak, A., et al. « Contrôle en cascade des entraînements électriques d'une station de pompage basé sur un régulateur flou astatique. *»Bulletin de l'Université technique nationale « KhPI ». Série : Énergie : Fiabilité et efficacité énergétique*, 2023.

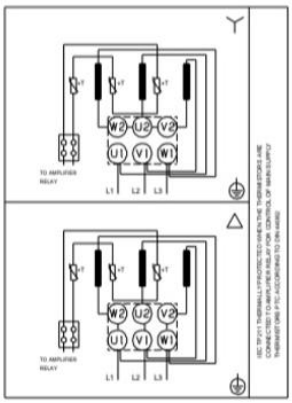
[21] https://energycrew.org/methode-de-ziegler-nichols-pour-la-parametrisation-du-pid/

Annexe :

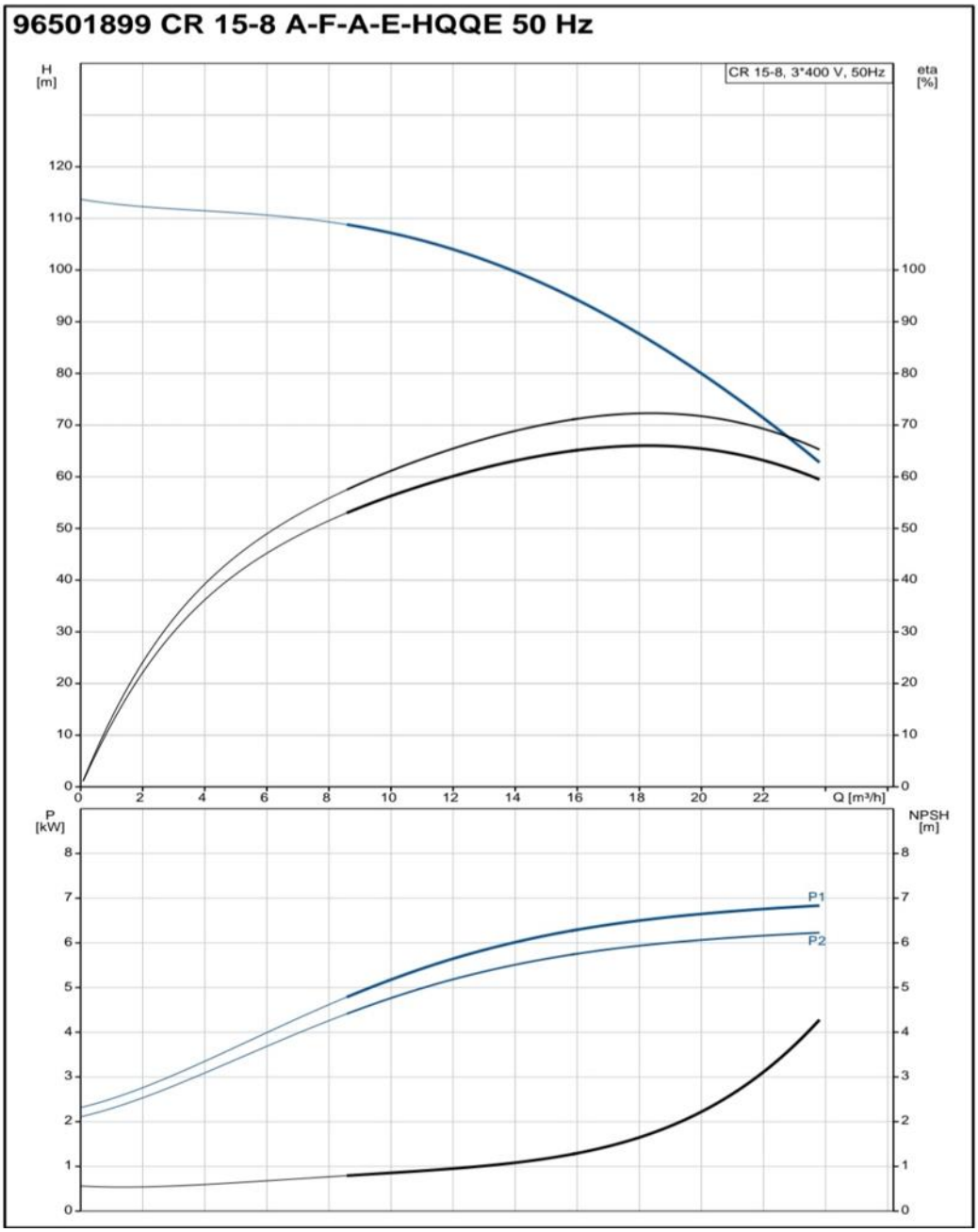
Description	Valeur
Information générale:	
Nom produit:	CR 15-8 A-F-A-E-HQQE
Code article:	96501899
Numéro EAN::	5700396231440
Technique:	
Débit nominal:	17 m³/h
Hmt nom.:	90 m
Etages:	8
Roues:	8
Number of reduced-diameter impellers:	0
Faible NPSH:	N
Pump orientation:	Vertical
Shaft seal arrangement:	Single
Code for shaft seal:	HQQE
Approvals on nameplate:	CE, EAC,ACS
Tolérance courbe:	ISO9906:2012 3B
Version pompe:	A
Modèle:	A
Matériaux:	
Base:	Cast iron
	EN 1561 EN-GJL-200
	ASTM A48-25B
Roue:	Stainless steel
	EN 1.4301
	AISI 304
Code matériau:	A
Code caoutchouc:	E
Palier int.:	SIC
Installation:	
Température ambiante maximum:	60 °C
Pression maximale de service:	16 bar
Pression maximum à la température indiquée:	16 bar / 120 °C
	16 bar / -20 °C
Type of connection:	DIN
Size of inlet connection:	DN 50
Size of outlet connection:	DN 50
Pressure rating for pipe connection:	PN 25
Flange rating inlet:	300 lb
Flange size for motor:	FF265
Code raccord:	F
Liquide:	
Liquide pompé:	Eau
Plage température liquide:	-20 .. 120 °C
Liquid temperature during operation:	20 °C
Masse volumique:	998.2 kg/m³
Donnée électrique:	
Motor standard:	IEC
Type moteur:	132SB
Classe de rendement IE:	IE3
Puissance nominale - P2:	7.5 kW
Puissance (P2) requise par pompe:	7.5 kW
Fréquence d'alimentation:	50 Hz
Tension nominale:	3 x 380-415D/660-690Y V
Courant nominal:	14,4-14,0/8,30-8,10 A
Intensité démarrage:	780-910 %
Cos phi - facteur de puissance:	0.88-0.82
Vitesse nominale:	2910-2920 mn-1
Rendement IE:	IE3 90,1%
Rendement moteur à pleine charge:	90.1-90.4 %
Rendement moteur à 3/4 charge:	90.8 %
Rendement moteur à 1/2 charge:	90.8 %
Nombre de pôles:	2







Annexe 1 : fiche technique du pompe



Annexe 2 : Courbes caractéristiques (H-Q) du pompe

Caractéristiques techniques (suite)

SITRANS P320 / SITRANS P420 pour pression relative (série pression)		
Précision de mesure		
Conditions de référence	• Selon IEC 62828-1 • Courbe caractéristique croissante • Début de mesure 0 bar/kPa/psi • Membrane de séparation inox • Cellule de mesure à remplissage d'huile silicone • Température ambiante 25 °C (77 °F)	
Déviation de la courbe caractéristique lors du réglage du point limite, incluant l'hystérésis et la répétabilité		
Plage de mesure r (étalement, Turn-Down)	r = étendue de mesure max./étendue de mesure réglée et plage de mesure nominale	
• Courbe caractéristique linéaire		
- 250 mbar/25 kPa/3.6 psi	r ≤ 1,25 : 1,25 < r ≤ 30 :	≤ 0,075 % (SITRANS P320) ≤ 0,065 % (SITRANS P420) ≤ (0,008 · r +0,065) %
- 1 bar/100 kPa/14.5 psi 4 bar/400 kPa/58 psi 16 bar/1,6 MPa/232 psi 63 bar/6,3 MPa/914 psi 160 bar/16 MPa/2321 psi	r ≤ 5 : 5 < r ≤ 100 :	≤ 0,065 % (SITRANS P320) ≤ 0,04 % (SITRANS P420) ≤ (0,004 · r +0,045) %
- 400 bar/40 MPa/5802 psi 700 bar/70 MPa/10152 psi	r ≤ 5 : 5 < r ≤ 100 : r ≤ 5 : 5 < r ≤ 100 :	≤ 0,075 % (SITRANS P320) ≤ (0,005 · r + 0,05) % (SITRANS P320) ≤ 0,075 % (SITRANS P420) ≤ (0,005 · r + 0,05) % (SITRANS P420)
Influence de la température ambiante en pourcentage par 28 °C (50 °F)		
• 250 mbar/25 kPa/3.6 psi	≤ (0,16 · r +0,1) %	
• 1 bar/100 kPa/14.5 psi	≤ (0,05 · r +0,1) %	
• 4 bar/400 kPa/58 psi 16 bar/1,6 MPa/232 psi 63 bar/6,3 MPa/914 psi 160 bar/16 MPa/2321 psi 400 bar/40 MPa/5802 psi	≤ (0,025 · r +0,125) %	
• 700 bar/70 MPa/10152 psi	≤ (0,08 · r +0,16) %	
Stabilité à long terme à ±30 °C (±54 °F)		
• 250 mbar/25 kPa/3.6 psi	Par an ≤ (0,25 · r) %	
• 1 bar/100 kPa/14.5 psi	En 5 ans ≤ (0,25 · r) % En 10 ans ≤ (0,35 · r) %	
• 4 bar/400 kPa/58 psi 16 bar/1,6 MPa/232 psi 63 bar/6,3 MPa/914 psi 160 bar/16 MPa/2321 psi 400 bar/40 MPa/5802 psi	En 5 ans ≤ (0,125 · r) % En 10 ans ≤ (0,15 · r) %	
• 700 bar/70 MPa/10152 psi	En 5 ans ≤ (0,25 · r) % En 10 ans ≤ (0,35 · r) %	
Temps de réponse indicielle T_{63} (sans amortissement électrique)	≤ 0,105 s	
Influence de la position de montage (en pression par modification de l'angle)	≤ 0,05 mbar/0,005 kPa/0.000725 psi par 10° d'inclinaison (correction du zéro possible par correction d'erreur de position)	
Influence de l'énergie auxiliaire (en pourcentage par variation de tension)	0,005 % par 1 V	
Conditions de fonctionnement		
Température du produit mesuré		
• Cellule de mesure à remplissage d'huile silicone	-40 ... +100 °C (-40 ... +212 °F)	
• Cellule de mesure avec huile de remplissage inerte		
- 1 bar/100 kPa/14.5 psi 4 bar/400 kPa/58 psi 16 bar/1,6 MPa/232 psi 63 bar/6,3 MPa/914 psi	-40 ... +100 °C (-40 ... +212 °F)	
- 160 bar/16 MPa/2321 psi 400 bar/40 MPa/5802 psi	-20 ... +100 °C (-4 ... +212 °F)	

Annexe 3 : fiche technique d'un transmetteur de pression

	Variateurs 400 V CA triphasés	Variateurs 230 V CA monophasés
Caractéristiques du réseau d'alimentation		
Plage de tension	380 V - 480 V CA (tolérance: -15 % à +10 %) 47 Hz à 63 Hz Un déclassement de courant est nécessaire aux tensions d'entrée / fréquences de découpage supérieures à 400 V / 4kHz. *	200 V - 240 V CA (tolérance: -15 % à +10 %) 47 Hz à 63 Hz Un déclassement de courant est nécessaire aux tensions d'entrée / fréquences de découpage supérieures à 230 V / 8kHz. *
Catégorie de surtension	EN 60664-1 catégorie III	
Configuration de réseau admissible	TN, TT, IT**, ligne de terre TT	TN, TT
Environnement de réseau	Deuxième environnement (réseau industriel privé) *	Premier environnement (réseau public)
Courant de surcharge	Puissance assignée 0,12 kW à 15 kW	150 % de la valeur assignée pendant 60 secondes
	Puissance assignée 18,5 kW (HO)/22 kW (HO)	
	Puissance assignée 22 kW (LO)/30 kW (LO)	110 % de la valeur assignée pendant 60 secondes
Conditions ambiantes		
Température de l'air ambiant	-10 °C à 40 °C : sans déclassement 40 °C à 60 °C : avec réduction (conforme à UL/cUL : 40 °C à 50 °C, sans déclassement)*	
Température de stockage	-40 °C à +70 °C	
Degré de protection	IP 20	
Taux hygrométrique maximal	95 % (sans condensation)	

Annexe 4 : fiche technique du variateurs de fréquence

SPÉCIFICATION

Paramètres d'un réservoir vertical en acier de 200 m³	Unité de mesure	Tarifs :
Dimensions générales		
Capacité de chargement (volume)	m³	200
Diamètre	mm	6 630
Hauteur	mm	6 000
Nombre de spires (pour la méthode d'enroulement)	pièces	1
Paroi verticale d'un réservoir en acier de 200 m³		
Poids net du mur	kg	5 033
Nombre d'anneaux du mur	pièces	4
Épaisseur de l'anneau supérieur	mm	5
Épaisseur de l'anneau inférieur	mm	5

Annexe 5 : fiche technique du réservoir