



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIC ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de L'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة أمحمد بوقرة ببومرداس
Université M'Hamed Bougara de Boumerdès
كلية المحروقات والكيمياء
Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie



Département d'Automatisation des Procédés et Électrification

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention du diplôme de Master

Spécialité : Instrumentations dans l'industrie Pétrochimique

Thème

Optimisation de la station de pompage SP1-ROB1 : Régulation de Débit et de Pression des Pompes D'expédition Du pétrole Brut

Présenté par :

LALIAM ALI

Devant le jury composé de :

M. FERTAS. N.L	GRADE MCB	Président
Mme. MENDIL. C	GRADE MCB	Examineur
M. KHELASSI. A	GRADE MCA	Encadrant

Année universitaire : 2024/2025

Dédicace

À mes parents,

Ce mémoire est avant tout le fruit de vos sacrifices inestimables.

À vous, mes chers parents, qui avez porté sur vos épaules des montagnes d'efforts pour que je puisse avancer sereinement dans la vie, je vous dédie chaque ligne de ce travail, chaque petite réussite, chaque pas accompli.

Sans votre amour indéfectible, votre travail acharné et votre foi en moi, je ne serais jamais devenu la personne que je suis aujourd'hui. Merci d'avoir été mes piliers, mes repères et mon inspiration au quotidien.

À ma petite sœur,

Malgré ton jeune âge, tu as su être une véritable lumière dans les moments d'ombre. Ton soutien moral, ta douceur et ta façon si simple mais si sincère de me redonner de la force m'ont souvent permis de ne pas abandonner. Tu as été un moteur silencieux mais puissant dans mon parcours.

À mes amis,

Merci d'avoir été là, dans les bons comme les mauvais moments. Vous avez su créer cet espace de respiration, d'évasion, qui m'a permis de me ressourcer, de rire, de relâcher la pression, pour mieux revenir et persévérer. Votre présence a été essentielle.

Enfin, à toutes les personnes proches qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à ce chemin :
Merci pour votre bienveillance, votre encouragement et votre foi en moi. Ce mémoire, c'est aussi un le vôtre.

Remerciements

Avant toute chose, je rends grâce à **Allah**, Le Très-Haut, Le Tout-Puissant, sans qui rien de tout cela n'aurait été possible. C'est par Sa volonté, Sa guidance et Son soutien constant que j'ai pu mener à bien ce travail.

Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde gratitude à **l'ensemble des enseignants du Département Automatisation**, en particulier ceux des spécialités **Instrumentation des procédés pétrochimiques** et **Commande automatique**, pour la qualité de leur enseignement, leur engagement et leur accompagnement tout au long de ma formation.

Je remercie tout spécialement **Monsieur KIFOUCHE**, chef du département, **Monsieur KHEBLI** et **Madame MENDILE. C**, pour leur dévouement et leur soutien, qui ont grandement contribué à mon évolution académique et personnelle.

Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à **mes encadrants, Monsieur KHELASSI Abdelmadjid** et **Monsieur KHELIFATI Badreddine**, qui m'ont suivi, guidé et encouragé tout au long de la réalisation de ce projet de fin d'études. Leur disponibilité, leur patience et leurs conseils avisés ont été d'une grande valeur pour moi.

Je remercie également **l'entreprise SONATRACH**, et tout particulièrement **l'Activité Transport par Canalisation (TRC)** de Beraki, pour m'avoir permis d'effectuer ce projet au sein de leurs services. Un grand merci à **Monsieur BOUIRI Rachid**, pour sa confiance et pour avoir mis à ma disposition les moyens techniques et humains nécessaires à la bonne conduite de mon travail.

Ma reconnaissance s'adresse également à **l'entreprise GCB**, notamment à **Monsieur BENAMMAR Samir**, Directeur Engineering Procurement, ainsi qu'à **l'ensemble des ingénieurs du département Instrumentation et Télécommunication**, dont **Monsieur BOUMEDIENE Abderraouf**. Leur accueil chaleureux, leur accompagnement attentif et leur volonté de partager leur savoir ont été essentiels pour la bonne réalisation de ce projet. Je leur suis profondément reconnaissant pour le temps qu'ils m'ont consacré et pour leurs explications toujours claires et enrichissantes.

Je remercie aussi chaleureusement **l'ensemble du personnel de TRC, de GCB**, ainsi que **la Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie de Boumerdès**, pour leur accueil, leur collaboration et leur contribution à la richesse de cette expérience professionnelle.

Enfin, je remercie toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réussite de ce travail, que ce soit par leur soutien moral, leurs conseils ou leur bienveillance. À vous tous, je dis **merci du fond du cœur**.

TABLE DES MATIERES

<u>Liste des figures</u>	
<u>Liste des tableaux</u>	
<u>Liste des abréviations</u>	
Introduction.....	1
1. CHAPITRE 1 : PRÉSENTATION de L'ENTREPRISE et du process.....	4
1.1. Présentation de l'entreprise et du process.....	4
1.1.1. Présentation de l'entreprise SONATRACH:	4
1.2. Domaines d'intervention du Groupe SONATRACH :	5
1.3. I.1.3 Centres de DISPATCHING:.....	5
1.4. Description des grandes activités du Groupe :.....	6
1.4.1. L'Activité Exploration-Production (E&P) :	6
1.4.2. L'Activité Transport par Canalisations (TRC) :	6
1.4.3. L'Activité Liquéfaction et Séparation (LQS) :	6
1.4.4. L'Activité Raffinage et Pétrochimie (RPC) :	6
1.4.5. L'Activité Commercialisation (COM):	6
1.4.6. L'Activité Transport par Canalisation (TRC) :	6
1.5. Description du Réseau de Transport :.....	7
1.6. PIPELINE:.....	7
1.7. Définition de l'oléoduc :	7
1.8. Définition du gazoduc :	8
1.9. Gaz naturel :	8
1.10. Pétrole brut :.....	8
1.11. Présentation de la station de pompage SP1-ROB1 :	8
1.11.1. Localisation et contexte :	8
1.11.2. Objectifs et rôle stratégique :	9
1.11.3. Capacités et caractéristiques techniques :	9
1.11.4. Organisation fonctionnelle de la station :	9
1.11.5. Les filtres de la station SP1-ROB1 :	10
1.11.6. Fonctionnement général de SP1-ROB1 :	11
1.12. Conclusion du chapitre 1 :	11
2. CHAPITRE 2 : Instrumentation, systèmes de contrôle/commande et protocoles de communication .	13
2.1. Instrumentation :	13
2.2. Capteurs	13
2.3. Transmetteurs :.....	13
2.4. Mesure de la pression :	14
2.4.1. Transmetteur de pression différentielle :	14

2.4.2. Indicateurs de pression :	14
2.5. Mesure de débit :	14
2.5.1. Débitmètre ULTRASON:	14
2.6. Mesure de niveau :	15
2.7. Vannes de contrôle :	15
2.8. Système de contrôle-commande :	15
2.8.1. Application du principe de régulation PID :	15
2.8.2. Représentation fonctionnelle d'une boucle de RÉGULATION :	16
2.9. Le régulateur PID : principe général :	17
2.9.1. Classification des régulateurs PID :	18
2.9.2. Types des régulateurs :	18
2.9.3. Application du PID dans la station SP1-ROB1 :	18
2.10. Régulation de débit, pression, et vitesse dans la station SP1-HEH/R-OB1	19
2.10.1. Régulation du DÉBIT:	19
2.10.2. Régulation de la PRESSION:	20
2.10.3. Régulation de la vitesse (VFD) :	20
2.10.4. Intégration des PID dans la régulation :	21
2.10.5. Régulation principale par variateurs de fréquence (VFD) :	22
2.11. Présentation générale des Variateurs de Fréquence (VFD) :	22
2.11.1. Structure et fonctionnement d'un VFD :	23
2.11.2. Avantages des VFD:	23
2.11.3. Application des VFD dans le contrôle des pompes de SP1-ROB1 :	23
2.11.4. Précautions d'installation et de maintenance :	24
2.12. Vannes de recyclage pour stabiliser le débit lorsque nécessaire :	24
2.13. Automates Programmables Industriels (PLC):	25
2.14. Définition générale d'un automate :	25
2.15. Architecture d'un automate programmable industriel :	26
2.16. Détail des composants internes de l'automate programmable :	27
2.17. Présentation de l'automate programmable SIMATIC S7-1500 :	31
2.17.1. Vue d'ensemble du S7-1500:	31
2.17.2. Caractéristiques principales :	31
2.17.3. Modules constituant un automate S7-1500 :	32
2.18. Système Numérique de Contrôle-Commande (DCS) :	32
2.18.1. Description générale :	32
2.18.2. Rôle du DCS:	33
2.18.3. Spécificités du DCS de la station SP1-ROB1 :	33
2.18.4. Détail des cartes E/S utilisées :	33
2.18.5. Programmation et redondance :	34

2.18.6. Infrastructure physique :	34
2.19. Système de Contrôle et d'Acquisition de Données (SCADA) :	34
2.19.1. Description GÉNÉRALE:	34
2.19.2. RÔLE:	34
2.19.3. Spécificités pour SP1-ROB1:	34
2.20. Interface Homme-Machine (HMI) :	35
2.21. Système d'Arrêt d'Urgence (ESD) :	35
2.22. Système de Détection Feu et Gaz (F&G) :	36
2.23. Interconnexion des systèmes :	37
2.24. Protocole de communication :	38
2.25. Protocole Modbus (RTU / TCP) :	38
2.26. Protocole Profibus DP / PA :	39
2.27. Protocole Profinet :	40
2.28. Conclusion du chapitre 2 :	41
3. CHAPITRE 3 : LOGICIELS DE SIMULATION.....	43
3.1. Présentation du logiciel Aspen HYSYS :	43
3.1.1. Cas d'utilisation du logiciel HYSYS :	43
3.1.2. Les modes de simulation :	43
3.1.3. La SIMULATION:	45
Programmation et supervision avec TIA Portal V19 :	46
3.1.4. Description du logiciel TIA Portal V19 [13] :	46
3.1.5. Le gestionnaire de projets TIA Portal :	47
3.1.6. L'organisation du programme :	47
3.1.7. Les langages de programmation :	47
3.1.8. Le simulateur S7-PLCSIM Advanced:	48
3.1.9. Supervision avec WinCC (TIA Portal) :	48
3.1.10. Avantages de l'intégration TIA Portal :	48
3.1.11. Fonctions de WinCC dans TIA Portal:	48
3.1.12. Structure d'un système automatisé :	48
3.1.13. L'architecture de contrôle et de commande	49
3.2. Solution hardware.....	50
3.2.1. Choix de l'automate :	50
3.2.2. Choix de la CPU:	51
3.2.3. Les modules d'entrées/sorties :	51
3.2.4. Tableau des Capteurs et Actionneurs	51
3.2.5. Module d'entrées analogiques	52
3.2.6. Modules de sorties :	52
3.2.7. Module d'alimentation :	53

3.3.	Solution logicielle proposée.....	54
3.3.1.	Fonctionnement global des boucles de régulation :	55
3.3.2.	Architecture générale des boucles de régulation :	55
3.3.3.	Mise à l'échelle des signaux analogiques :	56
3.3.4.	Contrôle des pompes principales et booster :	56
3.3.5.	Régulation de pression :	56
3.3.6.	Alternance des pompes :	56
3.3.7.	Gestion des alarmes :	57
3.3.8.	Séquence de recyclage et gestion des vannes :	57
3.3.9.	Configuration des régulateurs PID :	57
3.3.10.	Répartition de la programmation :	58
3.3.11.	Démarche de programmation :	58
3.3.12.	Zones de sauvegarde des blocs de programme :	63
3.4.	Principe de Fonctionnement des Function Blocks (FB) :.....	63
3.4.1.	FB1 – FB_Pump_Control : Contrôle des pompes principales et booster :	64
3.4.2.	FB2 – FB_Pump_Rotation : Gestion de l'alternance des pompes :	66
3.4.3.	FB3 – FB_Pressure_Control : Régulation de la pression	67
3.4.4.	FB4 – FB_Alarm_Management : Gestion des alarmes	68
3.4.5.	FB5 – FB_Valve_Control : Contrôle des vannes de recyclage et de refoulement	69
3.5.	Configuration de l'IHM :.....	71
3.6.	Conclusion du chapitre 3 : Logiciels de simulation et d'automatisation.....	73
CONCLUSION GÉNÉRALE.....		75

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.	Scénarios de débit.....	9
Tableau 2.	Caractéristiques des transmetteurs – Station SP1-HEH/R-OB1	13
Tableau 3.	Capteurs de niveau – Station SP1-HEH/R-OB1	15
Tableau 4.	Types de vannes – Station SP1-HEH/R-OB1	15
Tableau 5.	Rôle, avantages et inconvénients des actions P, I et D dans un régulateur PID.....	18
Tableau 6.	Scénarios d’exploitation selon les débits requis et la configuration des pompes activées	22
Tableau 7.	Paramètres de déclenchement et séquence d’ouverture de la vanne de recyclage MRV- 2205	25
Tableau 8.	Types de mémoire d’un automate programmable et leurs fonctions.....	30
Tableau 9.	Modules du SIMATIC S7-1500 et leurs fonctions.....	32
Tableau 10.	Caractéristiques techniques des cartes d’entrées/sorties du DCS SP1-ROB1	33
Tableau 11.	Tableau des capteurs.....	51
Tableau 12.	Tableau des actionneurs	52
Tableau 13.	Tableau d’entrées/sorties	54

LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Cartographie actuelle du réseau de transport	5
Figure 2.	Schéma de fonctionnement d'un capteur : de la grandeur physique au signal électrique.....	13
Figure 3.	Éléments constitutifs d'une boucle de régulation	16
Figure 4.	Schéma fonctionnel d'un régulateur avec comparateur et correcteur.....	16
	27	
Figure 5.	Schéma d'un automate programmable industriel (API) avec alimentation, CPU et modules TOR/analogique	27
Figure 6.	Aspen Technology Chaîne de logiciels en ligne	43
Figure 7.	Logiciel Aspen HYSYS V14	43
Figure 8.	Simulation de la Station de Pompage	45
Figure 9.	Profils de courbes de pompage	45
Figure 10.	DATA Logger	46
Figure 11.	Architecture d'un système d'automatisation avec API, interface homme-machine, capteurs et actionneurs	50
Figure 12.	CPU : 6ES7 511-1AK00-0AB0	51
Figure 13.	Module analogique AI 8xU/I/R/RTD	52
Figure 14.	DQ32x24 V DC/0.5A	53
Figure 15.	AQ 4xU/I ST.....	53
Figure 16.	PS 60W	54
FIGURE 17.	Vue Globale Des Blocs.....	58
Figure 18.	Configuration matérielle Dans Tia Portal	58
FIGURE 19.	Table des Mnémoniques Dans Tia portal.....	59
Figure 20.	Data Block dans Tia Portal	59
Figure 21.	Function Blocks dans Tia Portal	60
Figure 22.	Mise à l'échelle Pompe 1	60
Figure 23.	Table des Mnémoniques Dans Tia portal.....	61
Figure 24.	Data Block dans Tia Portal	61
Figure 25.	Function Blocks dans Tia Portal	62
Figure 26.	Mise à l'échelle Pompe 1	62
Figure 27.	Intégration dans OB1 du FB_Pump_Rotation	63
Figure 28.	Le FB_Pump_Control	65
Figure 29.	Le FB_Pump_Rotation	66
Figure 30.	Le FB_Pressure_Control	67
Figure 31.	Le FB_Alarm_Managment	68
Figure 32.	Le FB_Valve_Control.....	70
Figure 33.	PLC /HMI Network Connection	71
Figure 34.	HMI vue Initiale	71
Figure 35.	HMI vue Station.....	72
Figure 36.	HMI vue Alarme	72

Liste des abréviations :

- **API** : *Automate Programmable Industriel*
→ Unité de traitement automatisée utilisée pour contrôler des procédés industriels, en traitant des entrées/sorties logiques et analogiques.
- **CPU** : *Central Processing Unit*
→ Cœur de l'automate ; exécute le programme utilisateur, gère la mémoire, les entrées/sorties, et les communications.
- **DA** : *Donnée d'Activité*
→ Utilisé dans le cadre des rapports environnementaux ou de production.
- **DB** : *Data Block*
→ Blocs de données dans TIA Portal contenant des variables utilisées dans les blocs fonctionnels (FB).
- **DCS** : *Distributed Control System (SNCC en français)*
→ Système de contrôle industriel réparti, utilisé pour superviser et réguler des processus complexes.
- **DQ** : *Digital Output*
→ Sortie numérique de l'automate, utilisée pour envoyer des signaux de type TOR (Tout Ou Rien).
- **E/S** : *Entrées / Sorties*
→ Signaux numériques ou analogiques reliant les capteurs/actionneurs à l'automate.
- **ESD** : *Emergency Shutdown*
→ Système de sécurité assurant l'arrêt d'urgence de l'installation.
- **FB** : *Function Block*
→ Blocs fonctionnels dans TIA Portal regroupant du code réutilisable (ex : FB_Pump_Control, FB_Alarm_Management).
- **FC** : *Function*
→ Fonctions utilisées dans la programmation modulaire de TIA Portal.
- **F&G** : *Fire and Gas*
→ Système de détection incendie et gaz, souvent couplé à l'ESD pour sécuriser le site.
- **FCV** : *Flow Control Valve*
→ Vanne de régulation du débit.
- **HMI** : *Human-Machine Interface*
→ Interface Homme-Machine permettant la supervision graphique du procédé.
- **ICSS** : *Integrated Control and Safety System*
→ Système global combinant le contrôle et la sécurité d'un site industriel.

- **IHM** : *Interface Homme-Machine*
→ Équivalent français de HMI.
- **MRV** : *Main Recycle Valve*
→ Vanne principale de recyclage utilisée dans les scénarios de démarrage ou de protection contre la cavitation.
- **OB** : *Organization Block*
→ Blocs d'organisation dans TIA Portal, comme OB1, qui est le bloc principal de cycle.
- **PA/GA** : *Public Address / General Alarm*
→ Système de diffusion vocale d'alerte et d'alarmes générales en site industriel.
- **PCN** : *Process Control Network*
→ Réseau industriel sécurisé et souvent redondé pour les communications de supervision.
- **PID** : *Proportionnel - Intégral - Dérivé*
→ Type de régulateur automatique utilisé pour maintenir des grandeurs physiques stables (pression, débit...).
- **PLC** : *Programmable Logic Controller*
→ Terme anglais équivalent à API, utilisé pour désigner les automates industriels.
- **PLCSIM** : *PLC Simulator*
→ Logiciel de simulation d'automates, utilisé avec TIA Portal pour tester les programmes sans matériel.
- **PS** : *Power Supply*
→ Module d'alimentation d'un automate.
- **Q_Min_Operation** : *Débit minimal de fonctionnement*
→ Seuil technique en m³/h sous lequel une alarme ou un recyclage est déclenché.
- **RTU** : *Remote Terminal Unit* (non explicitement dans le texte mais commun dans ce domaine)
→ Unité à distance permettant la collecte de données et le contrôle de processus dans les sites éloignés.
- **SCADA** : *Supervisory Control And Data Acquisition*
→ Système de supervision centralisée pour les grandes installations industrielles.
- **SCL** : *Structured Control Language*
→ Langage structuré de haut niveau utilisé pour la programmation dans TIA Portal.
- **SIL** : *Safety Integrity Level*
→ Niveau d'intégrité de sécurité d'un système ou d'une fonction.
- **SNCC** : *Système Numérique de Contrôle-Commande*
→ Terme francophone équivalent à DCS.

- **TIA Portal** : *Totally Integrated Automation Portal*
→ Environnement de développement Siemens pour la programmation et la supervision industrielle.
- **TOR** : *Tout Ou Rien*
→ Signal binaire (0 ou 1) utilisé pour les capteurs ou actionneurs simples.
- **TRC** : *Transport par Canalisation*
→ Division de Sonatrach chargée du transport des hydrocarbures via pipelines.
- **VFD** : *Variable Frequency Drive*
→ Variateur de fréquence utilisé pour contrôler la vitesse des moteurs de pompe.

INTRODUCTION

« Le secteur des hydrocarbures, pilier de l'économie nationale, repose sur une chaîne logistique complexe où le transport du pétrole brut joue un rôle fondamental. Dans ce contexte, les stations de pompage sont des maillons essentiels, assurant l'acheminement continu et sécurisé des hydrocarbures depuis les sites de production ou de stockage vers les unités de traitement ou d'exportation. Ces installations doivent répondre à des exigences croissantes en termes de fiabilité, d'efficacité énergétique et de sécurité, d'où l'importance d'y intégrer des systèmes d'instrumentation et d'automatisation performants.

C'est dans cette optique que s'inscrit le présent travail, consacré à l'optimisation du contrôle et de la supervision de la station de pompage SP1-ROB1, relevant de l'activité de Transport par Canalisation (TRC) de l'entreprise Sonatrach. Cette station assure l'expédition du pétrole brut à partir du parc de stockage OB1, via des pompes principales dont le fonctionnement est conditionné par des paramètres critiques tels que la pression, le débit et la vitesse de rotation. La maîtrise de ces grandeurs nécessite la mise en œuvre de boucles de régulation complexes, intégrant variateurs de fréquence (VFD), vannes de régulation, et automates programmables.

Le choix de ce sujet s'explique par la volonté de contribuer à l'amélioration du fonctionnement de la station SP1-ROB1, en optimisant les régimes de fonctionnement (normal, dégradé, recirculation, etc.) et en assurant une régulation continue, précise et sécurisée de l'ensemble du processus.

L'objectif principal de ce mémoire est donc double : d'une part, réaliser une étude détaillée des éléments d'instrumentation et de commande en place, et d'autre part, concevoir et simuler un programme d'automatisation intégrant les différentes boucles de régulation et les scénarios de fonctionnement à l'aide des logiciels TIA Portal et Aspen HYSYS.

La problématique à laquelle ce travail tente de répondre est la suivante : comment assurer le bon fonctionnement des différents régimes d'exploitation de la station de pompage SP1-ROB1, tout en garantissant la stabilité des paramètres critiques tel à travers une automatisation fiable et adaptée ?

Pour y répondre, une démarche méthodologique a été adoptée, s'articulant autour de :

- L'analyse fonctionnelle et technique de la station SP1-ROB1 ;
- L'étude détaillée de l'instrumentation, des systèmes de contrôle/commande, et des protocoles de communication industriels ;
- La modélisation du procédé et la simulation des régulations via Aspen HYSYS afin de déterminer les paramètres du régulateur PID ;
- Le développement d'un programme d'automatisation sur TIA Portal V19, intégrant les conditions de fonctionnement normal, recirculation automatique, et défaillances.

En Conclusion, ce mémoire est structuré en trois chapitres :

- Chapitre 1 : présente l'organisme d'accueil Sonatrach, ainsi qu'une description technique de la station SP1-ROB1.
- Chapitre 2 : étude des boucles de régulation, des instruments de terrain, des systèmes de contrôle/commande (PLC, DCS, SCADA), et des protocoles de communication industriels.
- Chapitre 3 : La simulation du procédé à l'aide d'Aspen HYSYS et de la conception du programme d'automatisation sur TIA Portal.

Une conclusion finale de ce travail en donnant une synthèse des résultats obtenus et propose des pistes d'amélioration pour renforcer l'automatisation et la fiabilité de la station. »

CHAPITRE 01 :

**PRESENTATION DE L'ENTREPRISE
ET DU PROCESS**

1. CHAPITRE 1 : PRÉSENTATION DE L'ENTREPRISE ET DU PROCESS

1.1. PRÉSENTATION DE L'ENTREPRISE ET DU PROCESS

1.1.1. PRÉSENTATION DE L'ENTREPRISE SONATRACH:

SONATRACH est la compagnie nationale algérienne [01] de recherche, d'exploitation, de Transport par canalisations, de transformation et de commercialisation des hydrocarbures et de leurs dérivées. Elle intervient également dans d'autres secteurs tels que la génération électrique, les énergies nouvelles et renouvelables, le dessalement d'eau de mer, et le transport aérien et maritime.

A l'échelle internationale, SONATRACH est présente dans plusieurs projets avec différents partenaires en Afrique, en Amérique Latine et en Europe.

SONATRACH est un acteur majeur dans le domaine du pétrole et du gaz au niveau national et international [02]. Ce qui la place, aujourd'hui, comme première compagnie d'hydrocarbures en Afrique et en Méditerranée. Elle exerce ses activités dans quatre principaux domaines l'amont, l'aval, le transport par canalisations et la commercialisation du pétrole et du gaz.

Dans l'amont, SONATRACH opère, en effort propre ou en partenariat avec des compagnies pétrolières étrangères. Elle exploite des gisements parmi les plus importants au monde dans différentes régions du Sahara algérien : Hassi Messaoud, Hassi R'Mel, Hassi Berkine, Ourhoud, Tin Fouyé Tabankort, Rhourde Nouss, In Salah et In Amenas.

En matière de transport, le Groupe dispose d'un réseau de canalisations extrêmement dense qui s'étend aujourd'hui sur près de 22 000 kilomètres sur le territoire national. La compagnie a également aménagé quatre ports pétroliers de chargement d'hydrocarbures : Alger, Arzew, Bejaia et Skikda afin de permettre le chargement et le déchargement de gros tankers d'une capacité de 80 000 à 320 000 TM et de méthaniers.

Dans l'aval, SONATRACH compte six raffineries en activité sur le territoire et deux complexes pétrochimiques, quatre complexes de liquéfaction GNL et deux complexes séparation GPL.

SONATRACH emploie sur le territoire national près de 50 000 permanents et plus de 200000 personnes à l'échelle du groupe.

Le groupe compte 154 filiales et participations dont une quinzaine détenue à 100 % et œuvrant au quotidien à la valorisation de la chaîne de valeur pétrolière et gazière du pays. 105 sociétés prestent en Algérie et 49 autres à travers le monde, notamment, au Pérou, en Angleterre, en Espagne, au Mali, au Niger, en Mauritanie, en Libye.

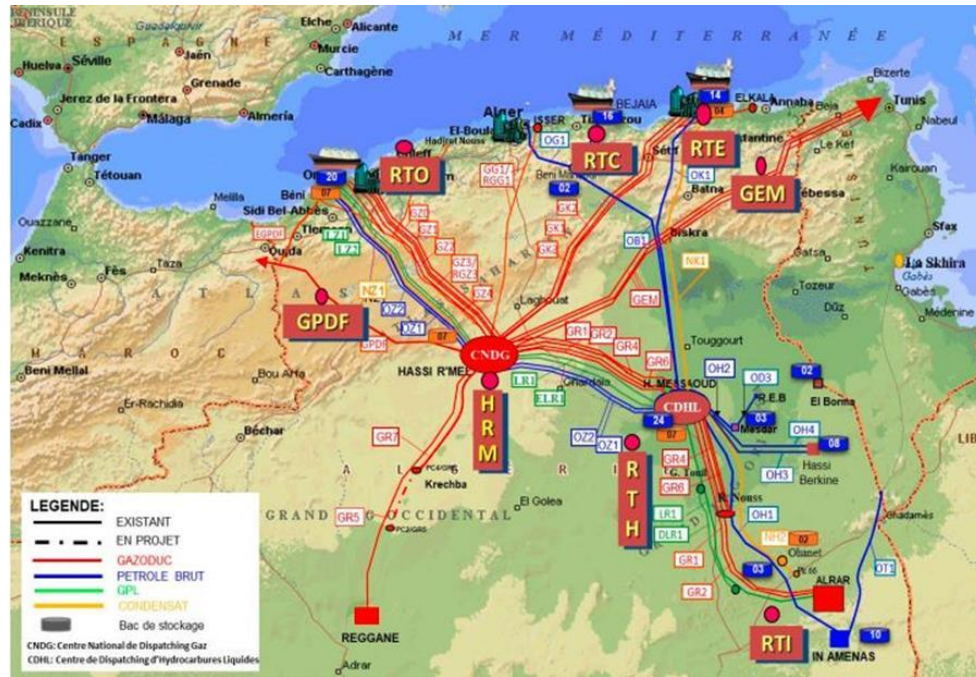


Figure 1. Cartographie actuelle du réseau de transport

1.2. DOMAINES D'INTERVENTION DU GROUPE SONATRACH :

Les sociétés du Groupe Sonatrach interviennent dans divers domaines, notamment :

- L'exploration et la production d'hydrocarbures ;
- Les services parapétroliers ;
- La production et la commercialisation d'engrais et de fertilisants ;
- La construction et l'engineering ;
- Le dessalement d'eau de mer ;
- Le transport aérien (Tassili Airlines) ;
- Le trading ;
- Le shipping.

1.3. I.1.3 CENTRES DE DISPATCHING:

Les centres de dispatching des hydrocarbures liquides et gaziers comptent parmi les installations névralgiques de l'Activité.

- Le Centre de Dispatching d'Hydrocarbures Liquides, le CDHL, se trouve à Hassi Messaoud (Haoud El Hamra).
- Le Centre National de Dispatching Gaz, le CNDG, se situe à Hassi R'mel.

I.1.4 Organisation des structures opérationnelles :

Les structures opérationnelles sont organisées autour des activités ci-après :

- Exploration-Production (E&P) ;
- Transport par Canalisations (TRC) ;
- Liquéfaction et Séparation (LQS) ;
- Raffinage et Pétrochimie (RPC) ;
- Commercialisation (COM).

1.4. DESCRIPTION DES GRANDES ACTIVITES DU GROUPE :

1.4.1. L'ACTIVITE EXPLORATION-PRODUCTION (E&P) :

L'activité Exploration-Production est chargée de l'élaboration et de l'application des politiques et stratégies d'exploration, de développement et d'exploitation de l'amont pétrolier et gazier.

1.4.2. L'ACTIVITE TRANSPORT PAR CANALISATIONS (TRC) :

L'Activité Transport par Canalisations est chargée de l'élaboration et de l'application des politiques et stratégies en matière de transport des hydrocarbures par canalisations.

1.4.3. L'ACTIVITE LIQUEFACTION ET SEPARATION (LQS) :

L'Activité Liquéfaction et Séparation est chargée de l'élaboration et de l'application des politiques et stratégies d'exploitation, de gestion et de développement des activités de liquéfaction et de séparation des gaz.

1.4.4. L'ACTIVITE RAFFINAGE ET PETROCHIMIE (RPC) :

L'Activité Raffinage et Pétrochimie est chargée de l'élaboration et de l'application des politiques et stratégies d'exploitation, de gestion et de développement du raffinage et de la pétrochimie.

1.4.5. L'ACTIVITE COMMERCIALISATION (COM):

L'activité Commercialisation est chargée de l'élaboration et de l'application des politiques et stratégies de commercialisation des hydrocarbures à l'extérieur et sur le marché national, dans le cadre des objectifs stratégiques de la Société.

1.4.6. L'ACTIVITE TRANSPORT PAR CANALISATION (TRC) :

Elle a pour missions de développer le réseau d'infrastructures de transport par canalisations, de stockage, de chargement et déchargement à travers les infrastructures portuaires à quai et en haute mer.

Le réseau de transport par canalisation assure le transport de toute production d'hydrocarbures des points d'entrée aux points de sortie. Il permet également d'alimenter le marché national, les complexes de GNL en Gaz, les complexes de séparation en GPL et les raffineries en pétrole brut et en Condensat.

L'excédent en gaz est destiné à l'exportation via le GEM, le GPDF/EGPDF et le GZ4 et l'excédent en pétrole brut et condensat est exporté via les ports d'Arzew, de Bethioua, de Béjaïa et de Skikda.

L'Activité TRC couvre plusieurs domaines à savoir :

- L'exploitation des ouvrages de transport des hydrocarbures et des installations portuaires à quai et en haute mer ;
- La maintenance des ouvrages de transport des hydrocarbures et des installations de chargement portuaires à quai et en haute mer ;
- Les études et développement, à l'exception des études relevant de la Direction Corporate Business Development et Marketing (BDM) et la réalisation de projets relevant de la Direction Centrale Engineering et Project Management.

1.5. DESCRIPTION DU RESEAU DE TRANSPORT :

Le réseau de transport des hydrocarbures liquides et gazeux est constitué d'un ensemble de canalisations, de stations de pompage, de stations de compression et de parcs de stockage. Il assure le transport des hydrocarbures depuis les pôles de production au sud, vers les pôles industriels de traitement et de liquéfaction, de transformation, d'exportation et d'alimentation du marché national.

Ce réseau de transport est composé de deux parties complémentaires :

Un réseau sud, qui assure le transport :

- Du pétrole brut et du Condensat vers Haoud El Hamra (CDHL) ;
- Du Gaz naturel vers Hassi-R'mel (CNDG) ;
- Du GPL vers Hassi-R'mel.
- Un réseau nord, qui assure le transport :
 - Du pétrole brut du CDHL vers les raffineries et les ports d'exportation ;
 - Du Condensat du CDHL et du gisement de Hassi R'mel vers la raffinerie de Skikda et les ports d'exportation ;
 - Du Gaz naturel du CNDG vers le Marché national, les gazoducs destinés à l'exportation et les complexes de liquéfaction ;
 - Du GPL issu des champs sud et de Hassi-R'mel vers les complexes de séparation.

Ces deux réseaux sont délimités par les deux centres de dispatching liquides de Haoud El Hamra (CDHL) et gazeux de Hassi-R'mel (CNDG), par lesquels transitent les effluents à l'exception :

- Des canalisations transportant les GPL ;
- La canalisation acheminant les condensats en provenance des champs de Hassi-R'mel ;
- Certaines injections en ligne de pétrole brut ;
- L'oléoduc OT1 reliant In Aménas à la frontière Algéro-Tunisienne, pour l'exportation à travers le port pétrolier de Laskhirra en Tunisie ;
- Des quantités de gaz naturel destinées à la réinjection et aux besoins du marché national.

1.6. PIPELINE:

Un pipeline est un réseau de tuyaux de type oléoducs pour le transport du pétrole brut et des produits raffinés et de type gazoducs pour le transport du gaz naturel. Les pipelines sont utilisés pour transporter le gaz ou le pétrole des gisements de production vers les centres de traitement et de consommation.

1.7. DÉFINITION DE L'OLÉODUC :

Un système comprenant des canalisations utilisées pour transporter le pétrole brut ou des produits pétroliers sur de longues distances, généralement des champs pétrolifères aux raffineries ou des raffineries aux centres de distribution. Les oléoducs sont souvent utilisés comme moyen de transport plus rentable et plus efficace que d'autres alternatives telles que les camions, les navires ou les trains. Ils peuvent être souterrains ou en surface. Il existe plusieurs types de pipeline selon le diamètre et la longueur du pipeline, certains peuvent atteindre des milliers de km.

1.8. DÉFINITION DU GAZODUC :

Les gazoducs sont utilisés pour transporter le gaz sur de longues distances, depuis les sites d'extraction ou de production jusqu'aux centres de distribution et de consommation. Les gazoducs sont généralement construits en acier ou en plastique haute densité, et sont équipés de vannes, de régulateurs de pression et d'autres équipements pour contrôler le débit et la pression du gaz.

1.9. GAZ NATUREL :

Le gaz naturel est un mélange d'hydrocarbures gazeux, comprenant principalement du méthane, mais aussi de l'éthane, du propane, du butane et du pentane ainsi que des impuretés telles que le dioxyde de carbone, le sulfure d'hydrogène, l'eau et l'azote. Il se forme de la décomposition des couches de matières végétales et animales.

La composition du gaz naturel peut varier fortement d'un gisement à l'autre.

La plupart des ménages utilise le gaz naturel pour se chauffer et cuisiner, il sert aussi à fabriquer des engrais, du combustible, de la peinture et de nombreux autres produits.

1.10. PÉTROLE BRUT :

Le pétrole brut est un mélange complexe d'hydrocarbures liquides, principalement constitué d'alcane (paraffines), de cycloalcanes (naphènes) et d'aromatiques, ainsi que de diverses impuretés comme le soufre, l'azote, l'oxygène, l'eau salée et des métaux (vanadium, nickel).

Il provient de la transformation lente, sur des millions d'années, de matière organique enfouie sous des sédiments, soumise à des pressions et températures élevées.

La composition du pétrole brut varie considérablement selon son origine géographique (léger ou lourd, doux ou soufré). Cette variabilité influence son raffinage et ses utilisations.

Le pétrole brut est la matière première essentielle pour la fabrication de carburants (essence, diesel, kérosène), de lubrifiants, de bitume, ainsi que de produits pétrochimiques entrant dans la fabrication de plastiques, textiles synthétiques, détergents et nombreux autres biens industriels.

Voici ton texte parfaitement renuméroté selon la logique du Chapitre I déjà structuré précédemment. J'ai respecté intégralement le contenu sans rien modifier, seulement ajusté la numérotation hiérarchique (avec chiffres romains pour les chapitres principaux, chiffres arabes pour les sous-parties, et décimales pour les sous-sections).

1.11. PRESENTATION DE LA STATION DE POMPAGE SP1-ROB1 :

1.11.1. LOCALISATION ET CONTEXTE :

La station de pompage SP1-ROB1 [03] est implantée à proximité du centre stratégique de Haoud El Hamra (HEH), dans le bassin de Hassi Messaoud, au sud-est de l'Algérie. Elle constitue le point de départ du pipeline OB1, d'une longueur de 670 km, qui relie Haoud El Hamra au terminal pétrolier de Béjaïa. Ce pipeline est vital pour l'approvisionnement des raffineries du nord (comme RA1G à Alger et la future raffinerie de Biskra) ainsi que pour les infrastructures portuaires d'exportation.

La station SP1-ROB1 a été construite pour remplacer l'ancienne station SP1/HEH, dans le cadre d'un projet de modernisation et de sécurisation du réseau de transport. Ce projet a été mené sous forme EPC par Sonatrach – Activité Transport par Canalisation, avec la collaboration de l'entreprise CPECC (China Petroleum Engineering & Construction Corporation).

1.11.2. OBJECTIFS ET RÔLE STRATÉGIQUE :

La station joue un rôle central dans le réseau national de transport par canalisation. Ses objectifs principaux sont :

- Sécuriser l'approvisionnement en brut des raffineries (RA1G, Biskra, etc.) ;
- Optimiser les flux d'exportation via le terminal de Béjaïa ;
- Gérer efficacement les volumes en provenance des parcs OB1, OK1, OZ1 et du CDHL, en les redirigeant vers le pipeline OB1.

1.11.3. CAPACITÉS ET CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES :

La station est conçue pour fonctionner selon cinq scénarios de débit [03] La station SP1-ROB1, allant de 800 à 2200 m³/h :

Scénario	Débit (m ³ /h)
1	800
2	1100
3	1400
4	1800
5	2200

Tableau 1. Scénarios de débit

Autres caractéristiques :

- Capacité maximale de conception : 2200 m³/h ;
- Durée de vie nominale : 25 ans ;
- Caractéristiques du brut moyen traité :
 - Densité : 796 kg/m³ ;
 - Viscosité à 20°C : 2.76 cSt ;
 - Pression de vapeur : 10.4 psia ;
 - BS&W : < 0.5% (teneur en eau et sédiments).

1.11.4. ORGANISATION FONCTIONNELLE DE LA STATION :

1.11.4.1. ZONE MANIFOLD :

- Point d'entrée des flux provenant des parcs OB1 (vers Béjaïa), OK1 (vers Skikda), OZ1 (vers Arzew) et du CDHL.
- Équipements : collecteurs, vannes motorisées, pompes de transfert, système de drainage, alimentation en air comprimé, dispositifs anti-incendie.

1.11.4.2. ZONE BOOSTER :

- Contient quatre pompes booster basse pression.
- Rôle : garantir une pression d'aspiration stable pour les pompes principales, éviter la cavitation.
- Autres équipements : traitement des eaux huileuses, drainage fermé, bassin d'évaporation.

1.11.4.3. ZONE PRINCIPALE D'EXPÉDITION :

- Composée de cinq pompes haute pression (4 en fonctionnement + 1 secours).
- Équipements supplémentaires : filtres à pétrole, débitmètres, pig launcher, système de retour, traitement d'eaux industrielles, système HVAC, générateurs diesel.

1.11.5. LES FILTRES DE LA STATION SP1-ROB1 :**1.11.5.1. DEFINITION ET ROLE DES FILTRES :**

Les filtres de pétrole brut éliminent les impuretés (sédiments, débris métalliques, résidus organiques) avant pompage, pour :

- Protéger les équipements (pompes principales) ;
- Maintenir la qualité du brut ;
- Prévenir les obstructions des pipelines et vannes ;
- Améliorer la sécurité des opérations.

1.11.5.2. SPÉCIFICITÉS TECHNIQUES :

Selon le manuel d'exploitation :

- Emplacement : en amont des pompes principales ;
- Nombre : cinq filtres à panier (4 en service + 1 de secours) ;
- Capacité : conçus pour 105% de la capacité maximale ;
- Pression nominale : 150# rating ;
- Matériaux : résistants à la corrosion, adaptés à la densité/viscosité du brut ;
- Maintenance : nettoyage/remplacement périodique (section 2.9.1) ;
- Conformité aux scénarios de débit définis (section 1.9.A).

1.11.5.3. CONNEXION AU RÉSEAU OB1 :

- Connexion via une nouvelle ligne de 24" sur 2500 m à l'oléoduc OB1.
- Le pipeline traverse un relief accidenté, culminant à 1029 m (col de Selatna).
- Stations intermédiaires : SP1 BIS, SP2, SP3 → SP1-ROB1 est un nœud logistique majeur.

1.11.5.4. SÉCURITÉ ET FIABILITÉ :

- Système de contrôle distribué (DCS) avec ESD intégré ;
- Détection incendie : systèmes à mousse et eau ;
- Alimentation électrique redondante par générateurs diesel ;
- Protection cathodique du pipeline pour prévenir la corrosion.

1.11.6. FONCTIONNEMENT GENERAL DE SP1-ROB1 :

1.11.6.1. ORIGINE DU PÉTROLE BRUT :

Les flux proviennent de :

- OB1 : brut destiné à Béjaïa ;
- OK1 : brut vers Skikda ;
- OZ1 : brut vers Arzew ;
- CDHL : collecte régionale.

Tous les flux sont dirigés vers le manifold, qui centralise et oriente les débits selon les scénarios définis.

1.11.6.2. RÔLE DU MANIFOLD :

Le manifold permet :

- La distribution vers les pompes ;
- La gestion des vannes selon les besoins ;
- Une flexibilité opérationnelle optimale.

Les flux sont ensuite dirigés vers :

1. Les pompes booster ;
2. Les pompes principales d'expédition.

1.11.6.3. INTERACTION ENTRE POMPES BOOSTER ET PRINCIPALES :

- Pompes booster : assurent une pression d'aspiration suffisante, évitent la cavitation, fonctionnement par besoin.
- Pompes principales : injectent le brut à haute pression dans l'oléoduc OB1 jusqu'à SP-BIS, SP2, SP3, puis Béjaïa.

1.12. CONCLUSION DU CHAPITRE 1 :

Ce premier chapitre a présenté SONATRACH, acteur majeur des hydrocarbures en Afrique, à travers sa mission et ses infrastructures. Il a mis en avant l'importance stratégique de l'Activité TRC et du réseau de transport, en se concentrant sur la station SP1-ROB1. Celle-ci, par sa modernité, ses capacités techniques et son rôle nodal, illustre l'engagement de SONATRACH dans la sécurité et la performance du transport pétrolier.

CHAPITRE 02 :

INSTRUMENTATION, SYSTEMES DE CONTROLE/COMMANDE ET PROTOCOLES DE COMMUNICATION

2. CHAPITRE 2 : INSTRUMENTATION, SYSTEMES DE CONTROLE/COMMANDE ET PROTOCOLES DE COMMUNICATION

2.1. INSTRUMENTATION :

2.2. CAPTEURS

Les capteurs sont des dispositifs essentiels en instrumentation, permettant de convertir une grandeur physique (pression, température, débit, niveau, etc.) en un signal mesurable, le plus souvent de nature électrique. Dans le secteur Oil & Gas, leur rôle est fondamental pour la surveillance des paramètres critiques, assurant un fonctionnement sécurisé et optimal des installations.

À titre d'exemple, la station de pompage SP1-HEH/R-OB1, située à Haoud El Hamra (Algérie), utilise des capteurs de pression comme PT-1202 et PT-1622 pour surveiller respectivement les pressions d'aspiration et de refoulement des pompes. Des capteurs de niveau tels que LG-1622 permettent, quant à eux, de suivre les niveaux des réservoirs d'air. Intégrés aux systèmes de contrôle, ces capteurs facilitent la détection précoce des anomalies (obstructions, débordements, etc.) et permettent l'automatisation des opérations.

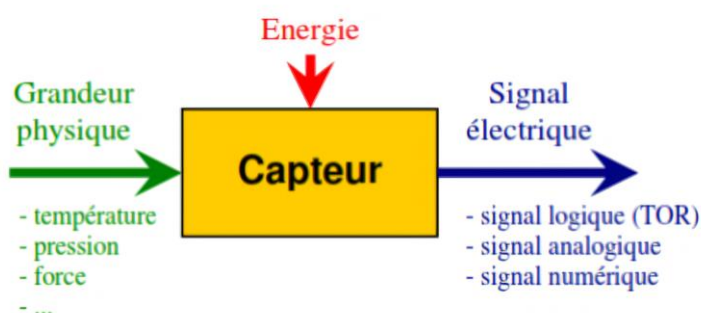


Figure 2. Schéma de fonctionnement d'un capteur : de la grandeur physique au signal électrique

2.3. TRANSMETTEURS :

Les transmetteurs assurent la conversion du signal brut issu des capteurs en un signal standardisé, généralement analogique (4–20 mA) ou numérique, afin de pouvoir l'exploiter dans les systèmes de contrôle. Le signal 4–20 mA est particulièrement répandu dans l'industrie pétrolière pour sa robustesse et sa compatibilité avec les systèmes DCS.

Dans la station SP1-HEH/R-OB1, les transmetteurs de pression (PT-1202, PT-1622) et de débit (FT-2205) utilisent ce standard, associé au protocole HART, permettant la communication bidirectionnelle (configuration, diagnostics à distance). Cette technologie garantit une transmission précise même dans des environnements industriels hostiles.

Type	Références	Fonction principale
Pression	PT-1202, PT-1622	Surveillance pression d'aspiration et de refoulement
Débit	FT-2205	Contrôle du débit dans les manifolds
Température	TT-1202, TT-2206	Suivi des températures au niveau des filtres et manifolds

Tableau 2. Caractéristiques des transmetteurs – Station SP1-HEH/R-OB1

2.4. MESURE DE LA PRESSION :

Le suivi des pressions dans les installations pétrolières est vital pour assurer la sécurité et optimiser le transport du brut. À la station SP1-HEH/R-OB1, plusieurs dispositifs sont utilisés :

- Transmetteurs de pression différentielle (PDT) : les PDT-2201/2204 contrôlent la pression en amont et en aval des filtres d'aspiration des pompes, permettant de détecter d'éventuelles obstructions.
- Indicateurs de pression locaux (PI) : les PI-3011/3012 (aspiration) et PI-3013/3014 (refoulement) fournissent une lecture visuelle directe, utile notamment en cas de défaillance du système de contrôle.

2.4.1. TRANSMETTEUR DE PRESSION DIFFÉRENTIELLE :

Le PMD75 d'Endress+Hauser mesure les écarts de pression via un capteur piézorésistif et une membrane métallique soudée.

Caractéristiques techniques :

- Plage de mesure : -100 à 100 mBar
- Sortie : 4–20 mA HART
- Précision : $\pm 0,075$ %
- Température de service : -40 à 85 °C
- Protection : IP67
- Normes : Conforme IEC 61508, SIL2/3
- Particularité : module HistoROM pour une gestion facilitée des paramètres

2.4.2. INDICATEURS DE PRESSION :

Les manomètres Bourdon Sensing Pressure Gauges (B.S.P.G.) de PRISMA permettent une lecture locale de la pression à travers une membrane déformée par le fluide.

Spécifications :

- Plage : 0 à 100 bars
- Précision : ± 1 %
- Température de service : -20 à 80 °C
- Indice de protection : IP66

2.5. MESURE DE DÉBIT :

La mesure du débit permet de détecter les fuites, identifier les dysfonctionnements et gérer efficacement les transferts de fluides. À SP1-HEH/R-OB1, les régulateurs FIC-1224 et FIC-1206 contrôlent les débits des pompes avec des consignes comprises entre 800 et 2200 m³/h, via un système "Scoop".

2.5.1. DÉBITMÈTRE ULTRASON:

Le G800 de FLEXIM utilise des ondes ultrasonores pour mesurer le débit, même dans les environnements explosifs (certifié ATEX Zone 1).

Spécifications :

- Plage de pression : 10 mbar à 250 bar
- Sortie : 4–20 mA
- Température ambiante : -40 à 200 °C
- Protection : IP66/IP68

- Particularité : mesure bidirectionnelle, y compris pour les gaz humides (jusqu'à 5 % de fraction liquide), diamètre DN 7 à DN 1600

2.6. MESURE DE NIVEAU :

Indispensable à la gestion des volumes, la mesure de niveau évite les débordements ou les situations de vide. Les LG-1622 surveillent visuellement le niveau des réservoirs d'air. Les pompes de drainage (P-1401) sont automatiquement contrôlées selon des seuils définis (ex. : H = 2600 mm pour haut niveau, H = 450 mm pour bas niveau), avec intégration au DCS.

Instrument	Application	Fonction principale
LG-1622	Réservoir d'air	Surveillance visuelle du niveau
Niveau P-1401	Pompes de drainage	Commande automatique démarrage/arrêt

Tableau 3. Capteurs de niveau – Station SP1-HEH/R-OB1

2.7. VANNES DE CONTRÔLE :

Les vannes assurent la régulation du débit et de la pression, tout en participant à la sûreté des installations. À SP1-HEH/R-OB1, trois types sont principalement utilisés :

- MOV (Motor Operated Valves) : comme MOV-1201 et MOV-2201, elles commandent les lignes d'aspiration/refoulement, via UCP ou manuellement en cas d'échec du DCS.
- FCV (Flow Control Valves) : FCV-1201/2201/2204 permettent de réguler le débit minimum au démarrage pour éviter la cavitation.
- PCV (Pressure Control Valves) : PCV-1200/2200 gèrent la pression de refoulement, maintenant les paramètres dans les limites acceptables.

Rôles clés des vannes de contrôle :

- Sécurité : Intégrées aux systèmes d'arrêt d'urgence (ESD)
- Précision : Réglage optimal du débit et de la pression
- Redondance : Modes manuel et automatique assurant la continuité

Type	Exemples	Rôle principal
MOV	MOV-1201, MOV-2201	Contrôle lignes d'aspiration/refoulement
FCV	FCV-1201, FCV-2201	Régulation du débit minimum
PCV	PCV-1200, PCV-2200	Gestion de la pression de refoulement

Tableau 4. Types de vannes – Station SP1-HEH/R-OB1

2.8. SYSTÈME DE CONTRÔLE-COMMANDE :

2.8.1. APPLICATION DU PRINCIPE DE REGULATION PID :

La régulation est l'action qui permet de maintenir automatiquement une grandeur physique à une valeur donnée, ou proche de celle-ci, malgré les perturbations susceptibles d'affecter le système.

Le principe de base de la régulation repose sur trois étapes fondamentales :

- Mesurer la grandeur physique (pression, débit, température, etc.) ;

- Comparer cette mesure avec la valeur de consigne ;
- Corriger en agissant sur le procédé afin de réduire l'écart entre la consigne et la mesure.

Chaque procédé industriel a ses exigences spécifiques, tant en termes de sécurité que de performance ou de contraintes matérielles. Il est donc essentiel que le système de régulation soit adapté à ces besoins.

2.8.2. REPRESENTATION FONCTIONNELLE D'UNE BOUCLE DE RÉGULATION :

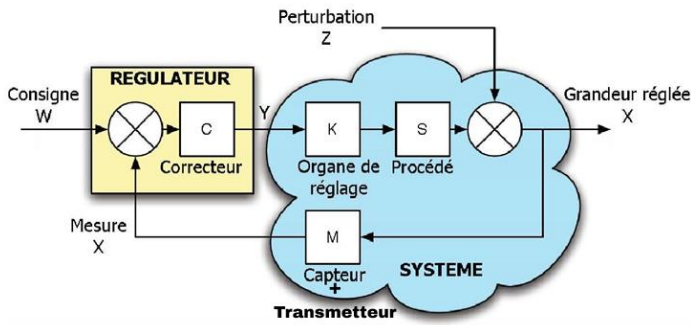


Figure 3. Éléments constitutifs d'une boucle de régulation

De manière générale, une boucle de régulation est constituée des éléments suivants :

- Un capteur de mesure, qui relève la grandeur physique ;
- Un transmetteur, souvent intégré au capteur, qui convertit la mesure en signal exploitable ;
- Un régulateur, qui analyse l'écart entre la mesure et la consigne ;
- Un actionneur (ou organe de réglage), qui applique la commande corrective au procédé.

Le régulateur reçoit deux informations essentielles :

- Le signal de mesure (X), transmis par le capteur ;
- La valeur de consigne (W), fixée par l'opérateur ou un système externe.

À partir de l'écart entre ces deux valeurs et selon l'algorithme de contrôle implémenté (PID, PI, etc.), le régulateur émet un signal de sortie (Y) à destination de l'actionneur, afin de ramener la variable contrôlée vers sa consigne

Schéma fonctionnel d'un :

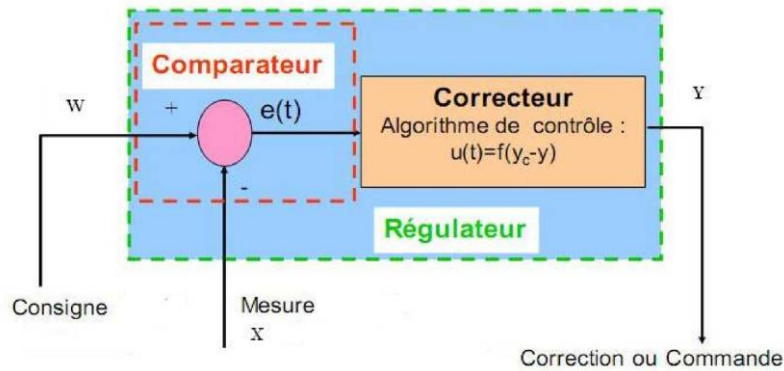


Figure 4. Schéma fonctionnel d'un régulateur avec comparateur et correcteur

2.9. LE REGULATEUR PID : PRINCIPE GENERAL :

Le régulateur PID [04] (Proportionnel – Intégral – Dérivé) est l'un des plus utilisés dans l'automatisation industrielle, notamment pour le contrôle de procédés continus. Il permet de maintenir une variable (comme la pression, le débit ou la température) autour d'une consigne cible, malgré les perturbations.

Le régulateur PID (Proportionnel – Intégral – Dérivé) détermine la commande à appliquer au système à partir de l'erreur de régulation, c'est-à-dire la différence entre la valeur de consigne souhaitée (W) et la valeur mesurée réelle (X) du procédé. Cette erreur est le signal d'entrée du régulateur.

Le but du régulateur est de générer un signal de sortie destiné à l'actionneur (comme un variateur de fréquence ou une vanne), afin de ramener la mesure vers la consigne et de maintenir la stabilité du système malgré les perturbations externes.

La commande calculée par le PID est constituée de trois composantes principales :

- L'action proportionnelle (P) :

Elle est directement liée à l'amplitude de l'erreur. Plus l'erreur est grande, plus la réponse du système est forte. Le gain proportionnel (K_p) détermine le niveau de réaction : un gain élevé entraîne une réponse rapide, mais peut aussi provoquer des oscillations.

- L'action intégrale (I) :

Elle tient compte de l'accumulation de l'erreur dans le temps. Elle permet de corriger les écarts résiduels que l'action proportionnelle seule ne peut pas supprimer. Le temps d'intégration (T_i) contrôle l'importance de cette action : plus ce temps est court, plus la correction intégrale sera forte, mais cela peut entraîner des instabilités si elle est mal réglée.

- L'action dérivée (D) :

Elle anticipe l'évolution future de l'erreur en observant sa variation dans le temps. Elle permet ainsi de freiner les changements trop rapides, stabilisant la réponse du système. Le temps de dérivation (T_d) détermine à quel point cette anticipation influence la commande finale. Une valeur trop élevée peut amplifier le bruit de mesure.

Lorsque le régulateur fonctionne dans un environnement numérique (automate programmable), la commande est calculée de manière discrète à chaque période d'échantillonnage (T_s). Cela signifie que le système analyse l'erreur actuelle, les erreurs passées, et l'évolution de l'erreur d'un cycle à l'autre pour produire une commande à intervalles réguliers.

En résumé, la sortie du régulateur PID à chaque instant dépend :

- De l'erreur actuelle (action P),
- De l'historique des erreurs passées (action I),
- De la vitesse de variation de l'erreur (action D).

L'ajustement des trois paramètres (K_p , T_i , T_d) permet d'optimiser le comportement dynamique du système de régulation en fonction des caractéristiques du procédé : rapidité, stabilité, précision, et robustesse face aux perturbations.

Action	Rôle principal	Avantages	Inconvénients
P	Correction immédiate de l'erreur	Réponse rapide	Erreur résiduelle en régime permanent
I	Suppression de l'erreur statique	Précision à long terme	Ralentit et peut déstabiliser la boucle
D	Anticipation des variations	Stabilisation, réduction d'oscillations	Sensible au bruit de mesure

Tableau 5. Rôle, avantages et inconvénients des actions P, I et D dans un régulateur PID

2.9.1. CLASSIFICATION DES RÉGULATEURS PID :

Les régulateurs PID peuvent être classés selon leur technologie :

- **Pneumatiques** : robustes, sortent un signal entre 0,2 et 1 bar. Adaptés aux zones ATEX, mais lents.
- **Électriques analogiques** : sortie 4-20 mA. Simples, mais de moins en moins utilisés.
- **Électroniques/numériques** : les plus répandus aujourd'hui, avec des fonctionnalités avancées :
 - Filtrage, linéarisation ;
 - Auto-réglage des coefficients ;
 - Choix du type d'action D ;
 - Interfaces opérateur (HMI), alarmes, courbes.

On distingue également :

- **Régulateurs auto-réglants** : nécessitent un paramétrage ponctuel par l'opérateur.
- **Régulateurs auto-adaptatifs** : adaptent automatiquement les paramètres en temps réel.

2.9.2. TYPES DES RÉGULATEURS :

Types de régulateurs :

- **P** : simple, rapide, mais laisse une erreur permanente.
- **PI** : supprime l'erreur statique avec une réponse modérée.
- **PD** : améliore la stabilité sans éliminer l'erreur statique.
- **PID** : combine les avantages des trois types.
- **Tout ou rien (TOR)** : sans modulation, pour les applications simples (ex. : thermostat).

2.9.3. APPLICATION DU PID DANS LA STATION SP1-ROB1 :

Dans la station de pompage SP1-ROB1, la régulation PID est utilisée pour :

- Stabiliser automatiquement le débit en fonction des besoins d'expédition ;
- Protéger les équipements (pompes, VFD, tuyauterie) contre les variations brusques ou les conditions anormales ;
- Optimiser la consommation énergétique en assurant un fonctionnement efficace des pompes.

Le PID est intégré dans le système de supervision (HMI/SCADA), pilotant les variateurs de fréquence des pompes principales et boosters, assurant ainsi une régulation dynamique en temps réel.

2.10. REGULATION DE DEBIT, PRESSION, ET VITESSE DANS LA STATION SP1-HEH/R-OB1

Dans la station SP1-HEH/R-OB1, la régulation du débit, de la pression, et de la vitesse des pompes est essentielle pour garantir un fonctionnement sûr et efficace, tout en optimisant l'exportation de pétrole brut.

Ces régulations s'appuient sur des capteurs, des indicateurs, des contrôleurs, et des variateurs de fréquence (VFD), interconnectés via des régulateurs PID intégrés au système de contrôle distribué (DCS).

Les pompes principales (P-1201 A/B/C/D/E, 1800 kW) et de surpression (P-2201 A/B/C/D, 225 kW) sont les principaux actionneurs, tandis que les vannes de contrôle (FCV, PCV) et les VFD ajustent les paramètres opérationnels.

2.10.1. RÉGULATION DU DÉBIT:

La régulation du débit permet de maintenir des flux de pétrole brut entre **800 et 2200 m³/h**, en fonction des besoins d'expédition vers les réservoirs OB1, OK1, OZ1, ou le terminal de Béjaïa.

Les instruments clés incluent :

- **Capteurs de débit :**
Les débitmètres à ultrasons (FT-2205, FLEXIM G800) mesurent le débit volumétrique avec une sortie 4-20 mA, couvrant une plage de 10 mbar à 250 bar.
Ils utilisent des transducteurs pour évaluer le temps de transit des ondes ultrasonores, garantissant une précision même pour des fluides visqueux.
- **Indicateurs de débit :**
Les indicateurs locaux (FI-1224, FI-1206) affichent les débits sur les manifolds d'aspiration et de refoulement, permettant une vérification manuelle par les opérateurs.
- **Contrôleurs de débit :**
Les contrôleurs FIC-1224 et FIC-1206, intégrés au DCS, utilisent un régulateur PID pour ajuster les vannes de contrôle de débit (FCV-1201, FCV-2201).
Le PID calcule l'erreur entre le débit mesuré (par FT-2205) et la consigne (par exemple, 1400 m³/h), puis ajuste l'ouverture des FCV pour atteindre la cible.

Relation avec les pompes :

Les pompes principales (P-1201 A/B/C/D/E) sont régulées pour maintenir des débits spécifiques. Par exemple, pour un débit de 1400 m³/h, deux pompes principales et deux pompes de surpression fonctionnent en série, avec les FCV ajustant le débit minimum pour éviter la cavitation.

Le régulateur PID, configuré avec un **gain proportionnel (Kp) modéré** et une **action intégrale (I)**, élimine l'erreur statique, assurant une réponse stable sans oscillations.

Régulation PID :

Le PID agit en **mode inverse** : si le débit mesuré dépasse la consigne, le contrôleur réduit l'ouverture des FCV ou la vitesse des pompes via les VFD, minimisant l'écart.

Les paramètres PID (**Kp**, **Ti**, **Td**) sont optimisés via des tests de mise en service pour éviter les surtensions ou les instabilités.

2.10.2. RÉGULATION DE LA PRESSION:

La régulation de la pression est cruciale pour protéger les équipements contre la surpression et garantir un acheminement optimal du pétrole brut.

Les instruments utilisés incluent :

- **Capteurs de pression :**
Les transmetteurs de pression différentielle (PDT-2201/2204, Endress+Hauser PMD75) surveillent la pression à travers les filtres d'aspiration, avec une plage de -100 à 100 mbar et une sortie 4-20 mA HART.
Les transmetteurs de pression absolue (PT-1202, PT-1622) mesurent les pressions d'aspiration (>6 bars) et de refoulement.
- **Indicateurs de pression :**
Les indicateurs locaux (PI-3011/3012 pour l'aspiration, PI-3013/3014 pour le refoulement, PRISMA B.S.P.G.) affichent les pressions directement sur site, avec une plage de 0 à 100 bars.
- **Contrôleurs de pression :**
Les PCV-1200 et PCV-2200, pilotés par des contrôleurs PIC-1200, utilisent un régulateur PID pour maintenir les pressions dans les limites opérationnelles (par exemple, pression de refoulement < 50 bars).

Relation avec les pompes :

Les pompes principales (P-1201 A/B/C/D/E) génèrent des pressions élevées pour transporter le pétrole sur **670 km via le pipeline OB1**.

Les PCV ajustent la pression de refoulement, tandis que les VFD contrôlent la vitesse des pompes pour éviter les surpressions.

Par exemple, si la pression mesurée par PT-1202 dépasse la consigne, le PID réduit la vitesse des pompes ou ouvre les PCV pour relâcher la pression.

Régulation PID :

Le PID opère en **mode inverse**, réduisant la commande (vitesse ou ouverture de vanne) lorsque la pression mesurée augmente.

L'**action dérivée (D)** anticipe les variations rapides, évitant les oscillations lors des démarrages ou arrêts des pompes.

2.10.3. REGULATION DE LA VITESSE (VFD) :

Les variateurs de fréquence (VFD) contrôlent la vitesse des moteurs des pompes principales et de surpression, optimisant la consommation énergétique et la performance opérationnelle.

Les instruments associés incluent :

- **Capteurs de vitesse :**
Bien que le manuel ne mentionne pas de capteurs de vitesse dédiés, les VFD intègrent des capteurs internes pour surveiller la fréquence des moteurs (ex. : 50 Hz nominal).

- **Indicateurs de vitesse :**
Les panneaux de contrôle unitaires (UCP) affichent la vitesse des pompes, permettant une surveillance locale.
- **Contrôleurs de vitesse :**
Les VFD, intégrés au DCS, utilisent des régulateurs PID pour ajuster la fréquence des moteurs en fonction des consignes de débit ou de pression.
Par exemple, le contrôleur "Scoop" ajuste la vitesse des pompes principales pour atteindre des débits de 800 à 2200 m³/h.

Relation avec les pompes :

Les VFD contrôlent les moteurs des pompes P-1201 A/B/C/D/E (1800 kW, démarrage par autotransformateur) et P-2201 A/B/C/D (225 kW).

Par exemple, pour un débit de 1800 m³/h, le VFD augmente la vitesse des pompes principales à environ 80 % de leur capacité nominale, réduisant la consommation énergétique par rapport à un fonctionnement à vitesse fixe.

Régulation PID :

Le PID ajuste la fréquence du VFD en fonction de l'erreur entre la consigne (débit ou pression) et la mesure réelle.

Par exemple, si le débit mesuré par FT-2205 est inférieur à 1400 m³/h, le PID augmente la fréquence du VFD, accélérant les pompes.

L'**action intégrale (I)** élimine les écarts à long terme, tandis que l'**action dérivée (D)** amortit les variations rapides lors des changements de consigne.

2.10.4. INTEGRATION DES PID DANS LA REGULATION :

Dans la station SP1-HEH/R-OB1, les régulateurs PID sont intégrés au **DCS [05]** et aux **panneaux de contrôle unitaires (UCP)**, formant des boucles de régulation pour chaque paramètre :

- **Boucle de débit :**
Le FIC-1224 compare le débit mesuré (FT-2205) à la consigne, ajuste les FCV-1201/2201 ou la vitesse des pompes via le VFD.
- **Boucle de pression :**
Le PIC-1200 utilise les données des PDT-2201/2204 ou PT-1202 pour ajuster les PCV-1200/2200, protégeant les pompes contre la surpression.
- **Boucle de vitesse :**
Le VFD, piloté par un PID, ajuste la fréquence des moteurs en fonction des consignes de débit ou de pression, optimisant l'efficacité énergétique.

Les paramètres PID (**Kp**, **Ti**, **Td**) sont configurés lors de la mise en service pour équilibrer **rapidité et stabilité**.

Par exemple, un **Kp élevé** accélère la réponse des pompes, mais un **Ti court** peut provoquer des oscillations.

En cas de panne du DCS, les opérateurs utilisent les **UCP pour une régulation manuelle**, assurant la continuité des opérations.

2.10.5. REGULATION PRINCIPALE PAR VARIATEURS DE FREQUENCE (VFD) :

a. Régulation dynamique via VFD et PID :

Chaque pompe principale de la station SP1-ROB1 est équipée d'un **variateur de fréquence (VFD)**, permettant un **contrôle précis de sa vitesse de rotation** en fonction de la demande en débit.

Cette régulation est assurée par un **régulateur PID en boucle fermée**, qui ajuste en continu la fréquence d'alimentation des moteurs.

Le PID compare en temps réel la **valeur mesurée du débit** (via un débitmètre en ligne) avec la **consigne de fonctionnement** définie par le scénario d'exploitation.

L'écart calculé est traité par l'algorithme PID qui génère un signal de commande envoyé au VFD.

Ce système assure :

- Une réponse rapide aux variations de demande,
- Une atténuation des fluctuations de débit,
- Une optimisation de la consommation énergétique.

Scénario	Débit visé (m ³ /h)	Pompes Booster	Pompes Principales	Particularités
1	800	1	1 (voire 2)	Activation d'une 2 ^e pompe si besoin
2	1100	2	2	-
3	1400	3	3	-
4	1800	3	3	Station SP1 BIS en service
5	2200	3	4	Station SP1 BIS en service

Tableau 6. Scénarios d'exploitation selon les débits requis et la configuration des pompes activées

Cette logique dynamique permet de moduler la **puissance hydraulique** délivrée par les pompes en fonction :

- De la **pression d'aspiration**,
- Des **conditions en aval**,
- Et des **besoins du réseau**.

2.11. PRESENTATION GENERALE DES VARIATEURS DE FREQUENCE (VFD) :

a. Définition et principe de fonctionnement :

Les Variateurs de Fréquence (VFD) [11] sont des dispositifs électroniques destinés à contrôler la vitesse de rotation des moteurs asynchrones triphasés, en modulant la fréquence et la tension de l'alimentation électrique.

Cette technologie est aujourd'hui incontournable dans les systèmes industriels modernes, notamment pour :

- Les pompes centrifuges,
- Les ventilateurs,
- Les convoyeurs,
- Les compresseurs.

La vitesse synchrone d'un moteur asynchrone est donnée par la relation :

(formule à insérer ici si nécessaire, par exemple $N_s = (120 \times f) / p$)

Où :

- N_s est la vitesse synchrone (tr/min),
- f est la fréquence de l'alimentation (Hz),
- p est le nombre de pôles du moteur.

En modulant la fréquence f , le VFD permet une variation continue de la vitesse, tout en maintenant un **rapport tension/fréquence (U/f)** constant, ce qui préserve le couple moteur.

2.11.1. STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT D'UN VFD :

Un variateur de fréquence est composé de **trois blocs fonctionnels principaux** :

1. **Redresseur AC/DC** :
Transforme la tension alternative du réseau (400–480 V triphasé) en une tension continue à l'aide de ponts de diodes ou de SCR.
2. **Lien DC (bus continu)** :
Composé de condensateurs et d'inductances, il filtre la tension continue pour en éliminer les ondulations.
3. **Onduleur DC/AC** :
Reconvertit la tension continue en tension alternative modulée, adaptée au moteur. Il utilise des transistors IGBT, pilotés en **modulation de largeur d'impulsion (PWM)**.

2.11.2. AVANTAGES DES VFD:

Les avantages principaux des VFD, selon le document technique de référence, incluent :

- Contrôle précis de la vitesse et du couple, même à bas régime (technologie de **contrôle vectoriel**).
- Réduction de la **consommation énergétique**, surtout dans les systèmes à charge variable.
- **Démarrage progressif (soft-start)**, limitant les pics de courant.
- **Entretien réduit** (absence de balais et collecteurs).
- **Adaptabilité environnementale** (résistance à l'humidité, à l'air salin, aux zones explosives).

2.11.3. APPLICATION DES VFD DANS LE CONTROLE DES POMPES DE SP1-ROB1 :

Les VFD assurent la **régulation dynamique** de la vitesse des **pompes principales et boosters**, selon la consigne de débit définie.

Exemples d'application :

- Pour un débit de **1400 m³/h** (scénario 3), les VFD pilotent trois pompes principales, ajustant leur vitesse pour maintenir le débit cible.
- En cas de **faibles débits (< 350 m³/h)**, les VFD interagissent avec la vanne **MRV-2205** via une boucle PID secondaire, activant automatiquement la recirculation pour éviter la cavitation.

2.11.4. PRECAUTIONS D'INSTALLATION ET DE MAINTENANCE :

Pour garantir leur fiabilité, les VFD doivent être installés et entretenus avec soin :

- Maintenir les composants **propres et secs** (éviter humidité et poussière).
- Assurer un **refroidissement efficace** des IGBT.
- Vérifier régulièrement les **connexions électriques** (éviter les desserrages dus aux vibrations).
- Inspecter les **condensateurs du bus DC** (gonflements, fuites).
- Tenir un **journal de maintenance préventive**.

2.12. VANNES DE RECYCLAGE POUR STABILISER LE DEBIT LORSQUE NECESSAIRE :**a. Risques liés à un faible débit dans les pompes centrifuges :**

Dans les stations de pompage telles que SP1-ROB1, le maintien d'un débit minimal dans les pompes centrifuges est essentiel afin d'éviter plusieurs risques majeurs :

- **Cavitation** due à la formation de bulles de vapeur dans les zones de basse pression ;
- **Surchauffe** des éléments hydrauliques internes ;
- **Usure mécanique prématurée** des composants (roulements, garnitures, etc.).

Pour prévenir ces phénomènes destructeurs, un **système de recirculation automatique** basé sur une vanne de recyclage est intégré à la logique de régulation du débit de la station.

b. Objectif de la recirculation automatique :

Lorsque la charge hydraulique diminue ou que la demande en aval baisse temporairement, le débit total peut chuter **en dessous du seuil critique minimal requis** pour un fonctionnement sûr.

- Pour les pompes principales de SP1-ROB1, ce **seuil est défini à 350 m³/h**.
- En dessous de cette valeur, les conditions hydrodynamiques deviennent instables, entraînant des **risques sérieux de cavitation, de vibrations, et de dommages matériels**.
- Le système de recirculation est alors **activé pour stabiliser le débit en boucle fermée**.

c. Procédure automatique de recyclage (vanne MRV-2205) :

Le dispositif de recirculation automatique s'appuie sur la vanne **MRV-2205 [12]**, qui joue le rôle de **soupape de protection**.

Le fonctionnement est entièrement **automatisé**, intégré à l'architecture du système SCADA via une **boucle PID secondaire**.

Le déroulement est le suivant :

1. Dès que le débit mesuré devient **inférieur à 350 m³/h**, le système entre en **surveillance temporaire** pour une durée de 1 minute.
2. Si cette condition persiste, la **vanne MRV-2205 s'ouvre à 15 %** pour démarrer un recyclage partiel, pendant 1 minute supplémentaire.
3. Si le débit reste toujours insuffisant, la **vanne s'ouvre totalement à 100 %**, permettant un **recyclage complet** du fluide jusqu'au retour à un régime hydraulique normal.

Paramètre	Valeur
Débit minimal admissible (MCF)	350 m ³ /h
Délai de surveillance	1 minute
Position initiale MRV-2205	15 % (pendant 1 min)
Position finale MRV-2205	100 % (ouverte)

Tableau 7. Paramètres de déclenchement et séquence d'ouverture de la vanne de recyclage MRV-2205

e. **Bénéfices du dispositif de recyclage :**

L'intégration de cette solution assure :

- Une **protection préventive** des équipements contre la cavitation ;
- Une **stabilité hydraulique renforcée** durant les phases transitoires ;

2.13. AUTOMATES PROGRAMMABLES INDUSTRIELS (PLC):

L'objectif principal de l'automatisation est de **produire de manière fiable et efficace**, tout en réduisant l'intervention humaine, afin d'obtenir des produits de qualité à moindre coût.

Dans le cas de la station de pompage **SP1-ROB1**, cette automatisation est assurée à l'aide d'**automates programmables industriels (API) [09]**.

Un **automate programmable industriel** est un équipement électronique dédié au **pilotage**, au **contrôle**, et à la **supervision en temps réel** de procédés industriels continus ou discrets.

Dans cette partie, nous présentons d'abord la **définition et l'architecture générale d'un automate**, puis les **logiciels utilisés**, notamment **TIA Portal** pour la programmation, et **WinCC** pour la supervision.

2.14. DÉFINITION GÉNÉRALE D'UN AUTOMATE :

a. **Historique :**

Les premiers automates programmables sont apparus en **1969**, avant même l'invention des microprocesseurs.

Ils étaient à l'époque construits à partir de **circuits logiques câblés** (relais électromagnétiques, systèmes pneumatiques, etc.).

Ces anciennes solutions souffraient de plusieurs limites :

- Aucune **flexibilité de modification** ;
- Aucune possibilité de **communication** avec d'autres systèmes.

L'introduction des systèmes à base de microprocesseurs a permis une **évolution majeure**, avec l'apparition des **automates programmables modernes**, beaucoup plus souples, évolutifs et adaptés aux exigences industrielles.

♦ **Remarque** : Les automates ont été conçus **par des automaticiens pour des automaticiens**, indépendamment de l'univers des ordinateurs, ce qui explique leur **adéquation parfaite avec les contraintes du terrain industriel**.

b. Rôle de l'automate :

L'automate joue le rôle d'**interface intelligente** entre le procédé et le système de commande.

- Les **entrées** (capteurs, interrupteurs de fin de course, sondes, etc.) transmettent des informations sur l'**état du procédé** (appelée *partie opérative*).
- L'automate **traite ces informations** selon une **loi de commande prédéfinie**.
- Les **sorties** (vannes motorisées, relais, contacteurs, moteurs, etc.) permettent **d'agir physiquement** sur le procédé.

Le comportement de l'automate dépend de la **logique de contrôle** définie par le concepteur du système :

- **Logique combinatoire** : les sorties dépendent uniquement de l'état instantané des entrées ;
- **Logique séquentielle** : les sorties dépendent également de l'**historique du système** (états mémorisés internes).

2.15. ARCHITECTURE D'UN AUTOMATE PROGRAMMABLE INDUSTRIEL :

Les **automates programmables industriels** peuvent être de type **compact (tout-en-un)** ou **modulaire (extensible)**, mais leur structure suit généralement la même logique :

a. Module CPU (Central Processing Unit):

- C'est le **cœur de l'automate** : il exécute le programme utilisateur, gère les **entrées/sorties** et supervise les **communications**.
- Il est équipé de :
 - Un **microprocesseur**,
 - Des **circuits périphériques**,
 - Des **mémoires RAM/EEPROM** pour stocker les données, programmes et paramètres.

b. Module d'alimentation :

- Il convertit le courant **alternatif** (souvent **220 V AC** ou **24 V DC**) en tensions **continues régulées** nécessaires au fonctionnement de l'automate :
 - **+5 V, ±12 V, ±15 V** selon les besoins.

c. Modules d'entrées :

- **Entrées tout ou rien (TOR)** : détectent les états logiques (0 ou 1) depuis des **interrupteurs, fins de course, boutons**, etc.
- **Entrées analogiques** : reçoivent des valeurs continues (ex. : température, pression, débit) via des signaux **0–10 V** ou **4–20 mA**.

d. Modules de sorties :

- **Sorties TOR** : envoient des signaux logiques à des **relais, contacteurs, voyants**, etc.
- **Sorties analogiques** : contrôlent les **variateurs, vannes proportionnelles**, etc.
- Certains modules **combinent entrées et sorties** dans un seul boîtier.

e. Modules de communication :

Ces modules permettent à l'automate de **communiquer avec d'autres équipements** (IHM, variateurs, supervision SCADA, etc.) via différents protocoles :

- **Interfaces série** : RS-232, RS-422, RS-485 ;
- **Bus de terrain** : Profibus, Modbus, CANopen, etc. ;
- **Réseaux Ethernet industriels** : Profinet, EtherNet/IP, etc.

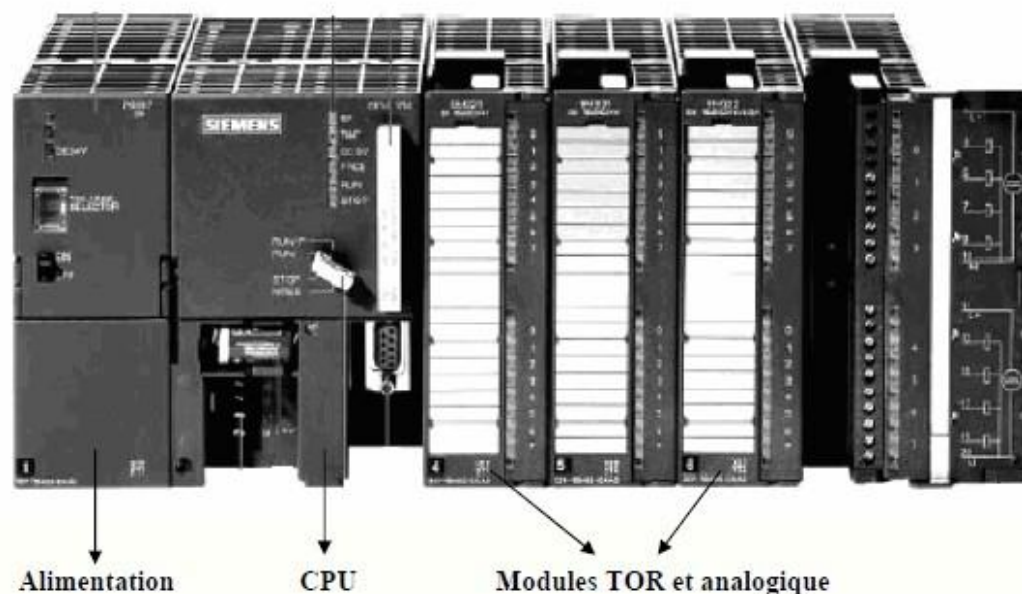


Figure 5. Schéma d'un automate programmable industriel (API) avec alimentation, CPU et modules TOR/analogique

2.16. DETAIL DES COMPOSANTS INTERNES DE L'AUTOMATE PROGRAMMABLE :

Pour mieux comprendre le fonctionnement global d'un automate, il est essentiel d'identifier précisément **le rôle de chacun des éléments** qui le composent.

Ci-dessous, nous présentons successivement les **principaux modules internes** d'un automate programmable industriel (API), tel qu'utilisé dans l'automatisation de la station de pompage **SP1-ROB1**.

a. Le processeur (CPU – Central Processing Unit) :

Le **processeur** est le **cœur du système**.

Il exécute le programme utilisateur en **interprétant les instructions ligne par ligne**. Il assure également :

- La **gestion de la mémoire**,
- La **communication entre les modules**,
- Et le **pilotage du cycle d'automatisation**.

Dans les automates modernes, le processeur est subdivisé en plusieurs **unités fonctionnelles internes** (unités arithmétiques, logiques, de gestion de communication, etc.), permettant une exécution **efficace et rapide** des opérations :

- Traitement logique et arithmétique des données ;
- Contrôle du déroulement cyclique du programme ;
- Surveillance des erreurs et des défaillances ;
- Communication avec l'interface de supervision (HMI/SCADA).

b. Les modules d'entrées/sorties (E/S) :

Les **modules d'E/S** permettent à l'automate de **communiquer avec le processus réel** (machines, capteurs, actionneurs).

Ils agissent comme **interfaces physiques** entre le **monde extérieur** et le **programme de l'automate**.

On distingue principalement **trois types de modules** :

• Modules TOR (Tout Ou Rien) :

Ces modules traitent des **signaux binaires** (0 ou 1, VRAI/FAUX, ON/OFF).

Ils sont utilisés pour connecter :

- Des capteurs binaires : boutons poussoirs, détecteurs de présence, fins de course, etc. ;
- Des actionneurs TOR : contacteurs, relais, voyants, électrovannes, etc.

Exemple dans SP1-ROB1 :

Détection de fin de course d'une vanne de recirculation.

• Modules analogiques :

Ils traitent des **valeurs continues**, souvent sous forme de **courant (4-20 mA)** ou **tension (0-10 V)**.

Ces modules sont utilisés pour :

- Lire des grandeurs physiques variables : pression, température, débit, niveau, vitesse, etc. ;
- Piloter des dispositifs proportionnels : vannes analogiques, variateurs de vitesse, etc.

c. Interfaces et cartes d'E/S (Entrées/Sorties) :

Les **interfaces d'E/S** représentent l'**adressage physique des signaux** :

- Chaque **entrée** est affectée à une **adresse unique** à laquelle sera connecté un capteur ou un signal d'information.

- Chaque **sortie** est reliée à une **adresse unique** pour commander un actionneur.

Ces cartes sont **modulaires**, ce qui permet d'**adapter le nombre de voies** aux besoins du projet :

- Modules de 8, 16 ou 32 voies ;
- Avec des tensions normalisées : **24 V**, **48 V**, **110 V** ou **230 V** (AC ou DC).

Dans le projet SP1-ROB1, on utilise typiquement :

- Des **cartes d'entrées 24VDC** pour capteurs de pression, débit, états de vannes ;
- Des **cartes de sorties TOR 24VDC ou 230VAC** pour pilotage de contacteurs ou électrovannes.

d. Schéma fonctionnel type :

Ce schéma fonctionnel illustre la **structure typique** d'un automate industriel :

- **CPU** avec mémoire **RAM/EEPROM**
- **Module d'alimentation**
- **Modules d'entrées** : capteurs TOR et analogiques
- **Modules de sorties** : vannes, moteurs, voyants
- **Bus de communication interne**
- **Interfaces de communication** (RS485, Profinet...)
- **Interface homme-machine (HMI)** ou **station SCADA**

d. Cartes d'entrées :

Les **cartes d'entrées** reçoivent les **signaux provenant des capteurs** (boutons poussoirs, capteurs de pression, interrupteurs de niveau, etc.).

Leur fonction principale est de :

- Mettre en forme les signaux électriques entrants,
- Filtrer les parasites,
- Assurer une **isolation galvanique** entre la partie commande (CPU) et la partie opérative.

e. Cartes de sorties :

Les **cartes de sorties** envoient les **signaux de commande vers les actionneurs** (relais, électrovannes, moteurs, voyants...).

Elles assurent :

- L'adaptation des niveaux de tension de la **CPU** à ceux requis par les actionneurs,
- La **protection électrique** de la CPU vis-à-vis de la puissance (grâce à une **isolation galvanique**).

f. Exemples de cartes spécifiques :

• **Cartes de comptage rapide :**

Permettent d'acquérir des signaux de **fréquence élevée** (ex. capteurs incrémentaux, codeurs), incompatibles avec les temps de cycle normaux d'un automate.

- **Cartes de commande d'axes :**

Assurent un **positionnement précis** d'éléments mécaniques sur un ou plusieurs axes (ex. servomoteurs), avec **retour de position** via un codeur.

- **Cartes d'E/S analogiques :**

Effectuent la **conversion analogique-numérique (CAN)** pour traiter des signaux continus (ex. 4-20 mA, 0-10 V).

- **Cartes de régulation PID :**

Intègrent directement des **boucles de régulation PID** dans le matériel pour un **traitement temps réel indépendant** de la CPU.

- **Cartes de pesage :**

Utilisées pour les applications de dosage, elles assurent la **lecture et le traitement de cellules de charge**.

- **Cartes de communication :**

Permettent l'échange de données via **RS485, Profinet, Ethernet, Modbus**, etc.

- **Cartes d'E/S déportées :**

Utilisées pour **étendre les capacités d'entrée/sortie** via des **modules distants**, souvent connectés par un **bus industriel** (ex. PROFINET, PROFIBUS).

g. Les mémoires :

Les automates disposent de **plusieurs types de mémoire**, chacune avec un rôle spécifique :

Type de mémoire	Fonction principale	Exemple
ROM / PROM	Stockage du firmware ou système d'exploitation de l'automate	Programme système
EEPROM	Stockage du programme utilisateur (non-volatile)	Logique de régulation, scénarios
RAM	Stockage temporaire des données en cours d'exécution	États, résultats intermédiaires
Mémoire avec pile	Sauvegarde des données critiques	Consigne de débit, états PID

Tableau 8. Types de mémoire d'un automate programmable et leurs fonctions

Remarque : Possibilité d'**extension par barrettes mémoire** selon les besoins de l'application.

h. L'alimentation :

Le **module d'alimentation** fournit l'énergie nécessaire à **tous les modules** de l'automate.

Typiquement :

- **Entrée** : 230 V AC monophasé,
- **Sortie** : 24 V DC pour alimenter la **CPU, modules E/S, HMI, etc.**

Des variantes existent :

- En **110 V AC**,
- Ou en **alimentation redondante** pour les applications critiques.

i. Liaisons de communication :

Les liaisons permettent la **transmission d'informations** :

- **Avec l'extérieur** :
via **borniers** (signaux électriques TOR, analogiques, etc.)
- **En interne** :
via **bus de fond de panier** ou **bus de terrain** (communication entre CPU, modules, HMI, etc.)

L'échange des **données, états, adresses et alarmes** est essentiel pour le **fonctionnement coordonné** de l'ensemble du système.

2.17. PRESENTATION DE L'AUTOMATE PROGRAMMABLE SIMATIC S7-1500 :

2.17.1. VUE D'ENSEMBLE DU S7-1500:

Le **SIMATIC S7-1500 [10]** est la dernière génération d'automates Siemens, destinée aux systèmes d'automatisation performants et évolutifs. Il est totalement intégré dans la plateforme **TIA Portal**, permettant une programmation, une configuration matérielle, une supervision et un diagnostic centralisés.

Il convient parfaitement à des applications critiques comme le contrôle et la supervision d'une **station de pompage pétrolière**.

2.17.2. CARACTÉRISTIQUES PRINCIPALES :

- Temps de cycle très court : traitement rapide des instructions logiques et arithmétiques.
- Interface **PROFINET intégrée** pour la communication et la programmation.
- Écran **couleur sur la CPU** pour diagnostics, tests et mise en service locale.
- Fonctions de **sécurité Fail-Safe (S7-1500F)** intégrées (SIL 3, PL e).
- Protection logicielle contre la **copie ou les accès non autorisés**.
- Compatibilité avec les **modules ET 200** pour les E/S déportées.
- Intégration des **fonctions technologiques** (motion, régulation PID, synchronisation...).

2.17.3. MODULES CONSTITUANT UN AUTOMATE S7-1500 :

Module	Fonction
PM (Power Module)	Convertit 230 V AC en 24 V DC
CPU (Unité centrale)	Exécute le programme, traite les données, communique avec les autres modules
SM (Signal Module)	Gère les E/S numériques et analogiques (TOR et analogiques)
TM (Technology Module)	Modules spécialisés pour régulation, pesage, axes, compteurs rapides
CM/CP (Communication)	Interfaces de communication : PROFINET, Modbus, OPC UA, etc.
Failsafe Modules (S7-1500F)	Intègrent les fonctions de sécurité pour les applications critiques

Tableau 9. Modules du SIMATIC S7-1500 et leurs fonctions

2.18. SYSTEME NUMERIQUE DE CONTROLE-COMMANDE (DCS) :

2.18.1. DESCRIPTION GÉNÉRALE :

Le **DCS (Distributed Control System) [05]**, ou **SNCC (Système Numérique de Contrôle-Commande)**, est un système automatisé basé sur des automates programmables industriels (PLC), utilisé pour la **supervision et le contrôle** des procédés industriels. Il repose sur une **architecture distribuée**, incluant des **unités centrales redondantes**, des **cartes d'entrées/sorties (E/S)**, et des **réseaux de communication industriels**, permettant le traitement **en temps réel** des données.

L'architecture classique d'un DCS est divisée en **quatre niveaux hiérarchiques** :

1. **Niveau 0 – Terrain (Field Level) :**
 - Capteurs (pression, température, débit, etc.)
 - Actionneurs (vannes, moteurs, pompes, etc.)
 - Connectés aux automates via E/S numériques ou analogiques
2. **Niveau 1 – Contrôle local (Control Level) :**
 - Automates DCS, PLC ou RTU
 - Exécution d'algorithmes de régulation (PID, logique booléenne, séquences)
 - Contrôleurs souvent redondants pour assurer la **tolérance aux pannes**
3. **Niveau 2 – Supervision (Supervisory Level) :**
 - Postes opérateurs de visualisation du procédé
 - Modification des consignes, surveillance des alarmes, enregistrement des historiques
 - Logiciels typiques : **WinCC, PCS 7, DeltaV, Foxboro I/A**, etc.
4. **Niveau 3 – Gestion de production (Production Management) :**
 - Intègre parfois des fonctions **MES (Manufacturing Execution Systems)**
 - Assure la coordination avec la gestion de production (ERP)

2.18.2. RÔLE DU DCS:

Le DCS assure plusieurs fonctions clés dans un système industriel :

- Régulation des **paramètres de procédé** (pression, débit, température)
- Exécution d'**algorithmes de contrôle** (PID, logique combinatoire ou séquentielle)
- Surveillance des équipements (états, défauts, alarmes)
- Configuration évolutive et flexible du système
- Diagnostic automatique des défaillances
- Intégration aux systèmes de supervision (SCADA/HMI)
- **Évolutivité** pour répondre aux besoins futurs du site

2.18.3. SPECIFICITES DU DCS DE LA STATION SP1-ROB1 :

Le système SNCC de la station SP1-ROB1 présente les caractéristiques suivantes :

- **Zones supervisées** : manifold, boosters, station principale
- **Automates** : certifiés **SIL 3**, avec **redondance** double, triple ou quadruple
- **Taux de charge CPU** : limité à 70 % maximum
- **Bus de communication** :
 - Redondants
 - Certifiés SIL 3
 - Connexions par câbles à **fibre optique** entre bâtiments
- **Alimentations** :
 - Doubles sources UPS 230 V – 50 Hz
 - Tension ± 2 %, fréquence ± 1 %
 - Basculement automatique **sans interruption**
- **Cycle d'acquisition** :
 - Temps de cycle maximal : **200 ms**
 - Vitesse de scrutation configurable

2.18.4. DETAIL DES CARTES E/S UTILISEES :

Type de carte	Caractéristiques
Entrées analogiques	4–20 mA (auto-alimentées ou externes), 1–5 V, RTD Pt100 (3 fils), CAN individuel
Sorties analogiques	4–20 mA, charge mini 400 Ω , résolution 12 bits, linéarité 0,1 %
Entrées/sorties digitales	24 Vcc, isolation optique 2500 V, surveillance de ligne (court-circuit, césure)

Tableau 10. Caractéristiques techniques des cartes d'entrées/sorties du DCS SP1-ROB1

2.18.5. PROGRAMMATION ET REDONDANCE :

- **Langages de programmation** : selon la norme **IEC 61131-3**
 - Ladder (LD)
 - GRAFCET (SFC)
 - Blocs fonctionnels (FBD)
- **Base de données des signaux** :
 - Identification via des **repères alphanumériques** (≥ 12 caractères)
- **Marge de conception prévue** :
 - 30 % de mémoire libre
 - 20 % de réserve de cartes E/S

2.18.6. INFRASTRUCTURE PHYSIQUE :

- **Armoires système** :
 - Dimensions standards : **800 x 2200 x 800 mm**
 - Fournisseur : **Rittal** ou équivalent
- **Barrières de sécurité intrinsèque** :
 - Assurent un niveau de performance **PFD $\leq 10^{-2}$**
- **Localisation** :
 - Salle Technique (ST) du **Bâtiment de Contrôle (BC)**

2.19. SYSTEME DE CONTROLE ET D'ACQUISITION DE DONNEES (SCADA) :

2.19.1. DESCRIPTION GÉNÉRALE:

Le SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) [08] est un système de supervision à distance qui collecte, traite, et archive les données des procédés. Il utilise des réseaux de communication sécurisés pour interagir avec des sites distants.

2.19.2. RÔLE:

Le SCADA assure la supervision globale, l'enregistrement des données historiques (via DHMS), et la communication avec les centres de dispatching.

2.19.3. SPÉCIFICITÉS POUR SP1-ROB1:

Le SCADA est intégré à l'ICSS et connecté au CDHL via fibre optique.

Il collecte :

- Mesures analogiques (débit, pression)
- États des équipements (marche/arrêt)
- Alarmes (seuils, défauts)

Il enregistre les séquences d'événements (SOER) avec une résolution de 150–250 ms.

Les OWS servent d'interface pour tendances, rapports et bypasses (MOS).

L'horloge interne est synchronisée par satellite (résolution 1 ms).

20 % de réserve matérielle et logicielle est prévue.

2.20. INTERFACE HOMME-MACHINE (HMI) :

a. Description générale :

L'HMI (Human-Machine Interface) est une interface graphique permettant aux opérateurs et ingénieurs d'interagir avec le DCS et les autres systèmes. Elle affiche des synoptiques, des alarmes, des tendances, et des états d'équipements via des stations de travail.

b. Rôle :

L'HMI traduit les données brutes en informations visuelles, permet la commande manuelle (marche/arrêt, réarmement), et facilite la maintenance via des outils de configuration. Elle enregistre les événements pour l'analyse post-incident.

c. Spécificités pour SP1-ROB1

L'HMI de SP1-ROB1 comprend :

- **Stations de Travail Opérateurs (OWS) :** installées dans la Salle de Contrôle Locale (SCL), elles affichent des vues synoptiques, alarmes (avec acquittement), états d'équipements (pompes, vannes), graphiques de tendances, et rapports.
- **Station de Travail Ingénieur (EWS) :** située dans la salle ingénieur du BC, avec moniteur 24", imprimante laser, sous Windows. Elle est dédiée à la programmation et à la maintenance du SNCC et du F&G.

L'HMI est connectée au réseau **PCN** du SNCC, affichant les données F&G et ESD.

Les vues sont configurées à partir de la **matrice de causes et effets**, avec des alarmes conformes à la norme **ISA 18.1**.

Une **réserve de 20 % d'espace disque** est prévue.

2.21. SYSTEME D'ARRET D'URGENCE (ESD) :

a. Description générale :

L'ESD (Emergency Shutdown System) [06] est un système de sécurité conçu pour arrêter les opérations en cas de conditions critiques. Basé sur des **PLC de sécurité**, il adopte une logique "**Fail Safe**" et est **certifié SIL** (Safety Integrity Level).

b. Rôle :

L'ESD a pour fonction principale de protéger les installations, les personnes et l'environnement.

Il **isole les équipements, ferme les vannes, et arrête les pompes** pour prévenir les accidents industriels majeurs.

c. Spécificités pour SP1-ROB1 :

l'ESD de SP1-ROB1 est **certifié SIL 3** et possède les caractéristiques suivantes :

- **Unités centrales** : en redondance multiple, avec comparaison automatique de mémoire.
- **Alimentations** : double alimentation **UPS 230 V – 50 Hz**, avec **CPI** (Contrôle Permanent d'Isolation).
- **Bus de communication** : redondants, certifiés SIL 3.
- **Cycle d'exécution** ≤ 150 ms.

Cartes d'entrées/sorties (E/S) :

- **Entrées analogiques** : 4–20 mA, RTD Pt100, avec **surveillance de boucle**.
- **Sorties analogiques** : 4–20 mA, résolution **12 bits**.
- **E/S digitales** : 24 Vcc, isolation optique, **RFL** fournis (Retours de Fonction Logicielle).

Fonctions assurées par l'ESD :

- Isolement automatique des **manifolds**,
- **Arrêt des pompes** principales et boosters,
- **Fermeture automatique des vannes critiques**,
- Commande par **boutons d'arrêt manuel**, protégés par capots de sécurité.

Réserves prévues :

- **20 % de capacité E/S**,
- **30 % de mémoire CPU** disponible pour évolutions futures.

Les **armoires ESD** sont situées dans la **Salle Technique (ST)**, intégrant des **barrières de sécurité intrinsèque** avec un **PFD** $\leq 10^{-2}$.

2.22. SYSTEME DE DETECTION FEU ET GAZ (F&G) :**a. Description générale**

Le système **F&G (Fire and Gas)** [07] est une solution de sécurité dédiée à la **détection précoce** des feux, des gaz **inflammables** ou **toxiques**, ainsi que des fumées. Il repose sur un réseau de **capteurs** connectés à des **automates de sécurité** (PLC) certifiés.

b. Rôle

Le F&G surveille **en continu** les zones à **risque**, déclenche les **alarmes sonores et visuelles**, et peut **initier automatiquement** certaines mesures de protection (fermetures de vannes, ventilation, arrêt d'équipements, etc.).

c. Spécificités pour SP1-ROB1 :

le système F&G de SP1-ROB1 est conçu pour assurer une détection rapide et fiable sur l'ensemble du site. Ses principales caractéristiques sont les suivantes :

- **Zone de couverture** : toutes les zones critiques sont équipées de **capteurs feu/gaz/fumée**.
- **Automates F&G** : PLC certifiés **SIL 3**, avec :
 - **Cycle de traitement** ≤ 150 ms

- **Redondance** assurée pour : unités centrales, **bus de communication**, et alimentations **UPS**.

Cartes d'entrées/sorties utilisées :

- **Entrées analogiques** : 4–20 mA, 1–5 Vcc, RTD Pt100.
- **Sorties analogiques** : 4–20 mA, résolution **12 bits**.
- **E/S digitales** : 24 Vcc, avec **isolation optique, filtres anti-bruit, sorties relais ou transistorisées**.

Interface locale F&G (FACP – Fire Alarm Control Panel) :

Installée dans la **Salle de Contrôle Locale (SCL)**, elle comprend :

- **Alarme visuelle LED** :
 - **Bleu** : détection gaz,
 - **Rouge** : détection feu,
 - **Jaune** : défaut d'oxygène (O₂ faible).
- **Boutons manuels** d'activation (sous capots de protection),
- **Alarme sonore distincte** de celle de l'ESD,
- **Bouton de silence** des alarmes.

Exploitation & configuration :

- Supervision des **MOS** (Manual Override Switches) via la station EWS.
- Programmation selon la **norme IEC 61131-3**, avec logique de déclenchement issue d'une **matrice de causes et effets**.

Réserves prévues :

- **20 % de capacité E/S,**
- **50 % d'alimentation,**
- **30 % de mémoire CPU.**

Les **armoires F&G** sont installées dans la **Salle Technique (ST)**.

2.23. INTERCONNEXION DES SYSTÈMES :

L'**ICSS (Integrated Control and Safety System)** de la station **SP1-ROB1** assure l'interconnexion efficace des **cinq systèmes principaux** :

- **SNCC (DCS)**
- **HMI**
- **SCADA**
- **ESD**
- **F&G**

Les flux d'informations sont gérés selon des niveaux de criticité, à travers des réseaux redondants et des liaisons directes.

a. Architecture d'interconnexion :

- **SNCC – HMI – SCADA :**
 - Communication via le **réseau PCN** redondant.
 - Affichage des **synoptiques, rapports** et alarmes sur les stations **OWS**.
 - Supervision centralisée par le **SCADA/CDHL**.
 - Archivage des données et événements via le système **DHMS**.
- **SNCC – ESD – F&G :**
 - Les communications **non critiques** (états, consignes) transitent par le **réseau PCN**.
 - Les signaux **critiques (d'arrêt, sécurité)** sont transmis par **liaison câblée directe (fil à fil)** pour garantir la redondance et la fiabilité.
- **F&G – ESD :**
 - En cas de détection (gaz, feu), le F&G transmet les ordres de **déclenchement automatique** au système **ESD**.
 - Les signaux destinés aux systèmes **PA/GA** (Public Address/General Alarm) sont câblés physiquement.

b. Vérification des performances :

L'ensemble des **liaisons inter-systèmes** est validé par des tests rigoureux :

- **FAT** : Factory Acceptance Test
- **IFAT** : Integrated FAT (intégration entre tous les systèmes)
- **SAT** : Site Acceptance Test

Ces tests valident la cohérence des signaux, les performances de traitement (≤ 150 ms), et la conformité aux exigences du cahier des charges.

2.24. PROTOCOLE DE COMMUNICATION :

La communication entre les différents composants de l'**ICSS** (Integrated Control and Safety System) de **SP1-ROB1** repose sur des **protocoles industriels standardisés**, choisis pour leur fiabilité, leur compatibilité multi-fournisseurs et leur conformité aux exigences de **sécurité fonctionnelle (SIL)**.

Ces protocoles assurent l'échange structuré de données entre :

- Les **capteurs/actionneurs de terrain**,
- Les **automates programmables industriels (PLC)**,
- Les **systèmes de supervision** (SCADA, HMI, ESD, F&G).

2.25. PROTOCOLE MODBUS (RTU / TCP) :**a. Description générale :**

Modbus est un protocole de communication largement répandu dans les environnements industriels. Il existe sous deux formes :

- **Modbus RTU** : version série sur RS-485, utilisée pour des liaisons filaires simples et fiables.

- **Modbus TCP** : version Ethernet, qui permet une vitesse de transmission élevée et une topologie plus flexible.

Sa simplicité, son architecture maître-esclave, et sa large compatibilité avec les équipements industriels (multimarques) en font un standard incontournable.

b. Rôle du Modbus à SP1-ROB1 :

Le protocole Modbus est utilisé à plusieurs niveaux de communication dans l'architecture SNCC :

- **Modbus TCP** :
 - Connecte les **instruments de terrain intelligents** (transmetteurs de pression, débit, température) aux **cartes d'E/S** du SNCC.
 - Transmet les mesures **analogiques (4-20 mA)** et **digitales (24 VDC)** à la supervision centrale.
 - Intégré dans le réseau **PCN sécurisé**, protégé par **pare-feux industriels** (cf. 0221-ROK1-INS-SG-007).
- **Modbus RTU** :
 - Utilisé pour dialoguer avec des **équipements legacy** ou des **packages autonomes** (ex. : électropompes, vannes motorisées, compresseurs).
 - Permet de récupérer les états (ON/OFF), alarmes, et de transmettre des commandes simples (start/stop).

c. Spécificités techniques :

- **Débit** : jusqu'à **100 Mbps** en Ethernet (Modbus TCP), quelques kbps pour Modbus RTU.
- **Topologie** :
 - **TCP** : point à point ou en étoile via switch Ethernet.
 - **RTU** : en bus RS-485, jusqu'à 32 esclaves par ligne.
- **Sécurité** :
 - Communications filtrées par des **pare-feux configurés** au niveau des **armoires système**.
 - Protection contre les intrusions extérieures et séparation des zones sûres/à risque.
- **Applications** :
 - Surveillance des **paramètres de procédé** : pression, température, niveau, débit.
 - Acquisition des données des **capteurs F&G** (ex. : concentration de gaz, fumée).
 - Transmission des **ordres ESD** (arrêt d'urgence, fermeture de vannes, isolement d'équipements).

2.26. PROTOCOLE PROFIBUS DP / PA :

a. Description générale :

Profibus (Process Field Bus) est un protocole de communication **numérique** normalisé selon la norme **IEC 61158**, conçu pour les échanges de données industrielles entre les automates, modules d'E/S, et instruments de terrain. Il existe deux principales variantes :

- **Profibus DP (Decentralized Peripherals)** : destiné aux **automates** et **modules d'E/S déportés**.
- **Profibus PA (Process Automation)** : conçu pour la **transmission à bas débit**, notamment dans les **zones dangereuses (ATEX)**.

Les deux variantes utilisent des câbles à paires torsadées blindées, mais PA permet également l'**alimentation des capteurs** via le même câble que les données.

b. Rôle de Profibus à SP1-ROB1 :

À SP1-ROB1, Profibus joue un rôle essentiel dans le **pilotage distribué** et la **sécurité en zones classées** :

- **Profibus DP** :
 - Utilisé pour la **liaison entre les PLC du SNCC et les modules d'E/S déportés**.
 - Assure la **commande des électropompes**, via les unités de contrôle de puissance (UCP).
- **Profibus PA** :
 - Connecte les **capteurs intelligents et actionneurs** installés dans les zones à **atmosphère explosive (ATEX)**.
 - Permet la **supervision fine** des paramètres process sensibles (pression, débit, température).

c. Spécificités techniques :

- **Débit** :
 - Profibus DP : jusqu'à **12 Mbps**, adapté aux échanges rapides entre automates.
 - Profibus PA : **31.25 kbps**, optimisé pour les instruments en zone dangereuse avec alimentation intégrée.
- **Topologie** :
 - Architecture en **bus linéaire** avec **terminaisons résistives (RFL)**, comme spécifié dans **0221-ROK1-INS-SG-007**.
 - Possibilité de **segmenter le réseau** via des répéteurs ou coupleurs DP/PA.
- **Applications spécifiques à SP1-ROB1** :
 - **Surveillance feu et gaz (F&G)** : acquisition des mesures en zone ATEX.
 - **Commande des actionneurs ESD** : sécurité temps réel via réseau dédié.
 - **Optimisation des diagnostics terrain** : détection de dérives, erreurs de communication ou alimentations défailtantes.

2.27. PROTOCOLE PROFINET :

a. Description générale :

Profinet (Process Field Net) est un protocole **Ethernet industriel** développé par Siemens comme **successeur de Profibus**, permettant des communications :

- **Temps réel déterministes**,
- **À haut débit**,
- **Sur réseaux Ethernet standards**.

Il se base sur des standards ouverts comme **IEEE 802.3** et **TCP/IP**, tout en intégrant des extensions spécifiques pour assurer la performance et la fiabilité requises dans l'automatisation industrielle.

Il existe plusieurs classes de performance :

- **Profinet RT (Real-Time)** : pour les applications de contrôle standard ;
- **Profinet IRT (Isochronous Real-Time)** : pour les applications très critiques, comme les mouvements synchronisés.

b. Rôle de Profinet à SP1-ROB1 :

À SP1-ROB1, **Profinet est l'infrastructure principale** pour les échanges rapides entre les différents sous-systèmes d'automatisation :

- Assure la communication **entre les PLC du SNCC** et les équipements intelligents.
- Utilisé pour le **pilotage des variateurs de fréquence (VFD)** dans la Salle Technique (ST).
- Interconnecte les **modules d'E/S déportés**, les **centres de commande moteurs (MCC)** et le **Power Management System (PMS)**.
- Permet une **synchronisation fiable** entre les PLC redondants.

c. Spécificités techniques :

- **Débit** : Jusqu'à **1 Gbps**, permettant des transferts massifs de données avec une faible charge réseau.
- **Temps réel** :
 - Latence < **1 ms** en Profinet RT ;
 - Synchronisation rigoureuse avec Profinet IRT (**0221-ROB1-INS-SG-006**).
- **Applications principales à SP1-ROB1** :
 - **Commande dynamique des VFD** selon les besoins de débit/pression.
 - **Synchronisation** des données de processus entre PLC.
 - **Diagnostic en ligne** des équipements connectés (vannes, moteurs, capteurs intelligents).
 - **Extension rapide** du système via modules déportés compatibles.

2.28. CONCLUSION DU CHAPITRE 2 :

Le chapitre 2 a détaillé l'infrastructure d'instrumentation et de contrôle-commande de la station de pompage SP1-HEH/R-OB1, mettant en lumière l'importance des capteurs, transmetteurs, vannes, variateurs de fréquence (VFD) et régulateurs PID pour assurer un fonctionnement sûr, efficace et automatisé du transport pétrolier. Les systèmes DCS, SCADA, HMI, ESD et F&G, interconnectés via des protocoles industriels comme Modbus, Profibus et Profinet, garantissent une supervision précise, une gestion des alarmes et une protection contre les incidents critiques. Les automates SIMATIC S7-1500, au cœur de l'automatisation, orchestrent les boucles de régulation pour maintenir débit, pression et vitesse dans des plages optimales, tout en optimisant la consommation énergétique. Cette architecture robuste et redondante répond aux exigences strictes du secteur Oil & Gas, assurant fiabilité et performance.

Ce chapitre pose ainsi les bases techniques du contrôle-commande, mais la mise en œuvre effective de ces systèmes repose sur des outils logiciels avancés pour la simulation, la programmation et la supervision. Le chapitre suivant explorera ces solutions, notamment **Aspen HYSYS** pour la modélisation des procédés et **TIA Portal V19** pour optimiser les performances de la station SP1-HEH/R-OB1

CHAPITRE 03:

LOGICIELS DE SIMULATION

3. CHAPITRE 3 : LOGICIELS DE SIMULATION

3.1. PRESENTATION DU LOGICIEL ASPEN HYSYS :

Le logiciel HYSYS (Hyprotech Systems) [15] est un simulateur orienté modèle, développé par AspenTech principalement pour l'industrie pétrolière, utilisé également pour d'autres types de procédés chimiques. Il fait partie des plus performants logiciels de simulation.



Figure 6. Aspen Technology Chaîne de logiciels en ligne



Figure 7. Logiciel Aspen HYSYS V14

3.1.1. CAS D'UTILISATION DU LOGICIEL HYSYS :

Ce simulateur peut être utilisé :

a. Lors de la conception d'un procédé industriel afin de :

- Établir des bilans de matière et d'énergie ;
- Dimensionner les équipements.

b. Ou dans le suivi des procédés déjà installés afin de :

- Réajuster les paramètres de fonctionnement dans le cas de changement de composition ou des conditions de fonctionnement de certains équipements ;
- Déterminer les performances des équipements.

3.1.2. LES MODES DE SIMULATION :

Le logiciel HYSYS dispose de deux modes de simulation à savoir :

1. Mode stationnaire (Steady State) :

Dans ce mode, la simulation est basée sur l'équilibre des masses et des énergies à un état stable donné. Il suppose que les conditions du système sont constantes dans le temps, sans fluctuations significatives.

Ce mode est utilisé pour :

- La conception préliminaire des processus,
- L'optimisation des opérations continues,
- La résolution de problèmes statiques.

Il fournit des résultats instantanés et précis pour des conditions d'équilibre spécifiques, mais ne prend pas en compte les variations transitoires.

2. Mode dynamique (Dynamic) :

Le mode dynamique permet la modélisation des phénomènes transitoires et des variations temporelles dans un processus.

Il est utilisé pour simuler les réponses du système à des changements de conditions, tels que :

- Les démarrages,
- Les arrêts,
- Les variations de charge,
- Les perturbations, etc.

Dans ce mode, le temps est pris en compte, et les simulations peuvent être effectuées sur des périodes prolongées pour étudier les comportements transitoires.

Il est particulièrement utile pour :

- La conception de contrôles de processus,
- L'analyse de la stabilité,
- La compréhension des réponses dynamiques des installations.

Le choix du mode dépend des objectifs spécifiques de la simulation et des informations recherchées. Certains cas d'étude peuvent nécessiter une combinaison des deux modes pour une analyse complète des systèmes.

3.1.3. LA SIMULATION:

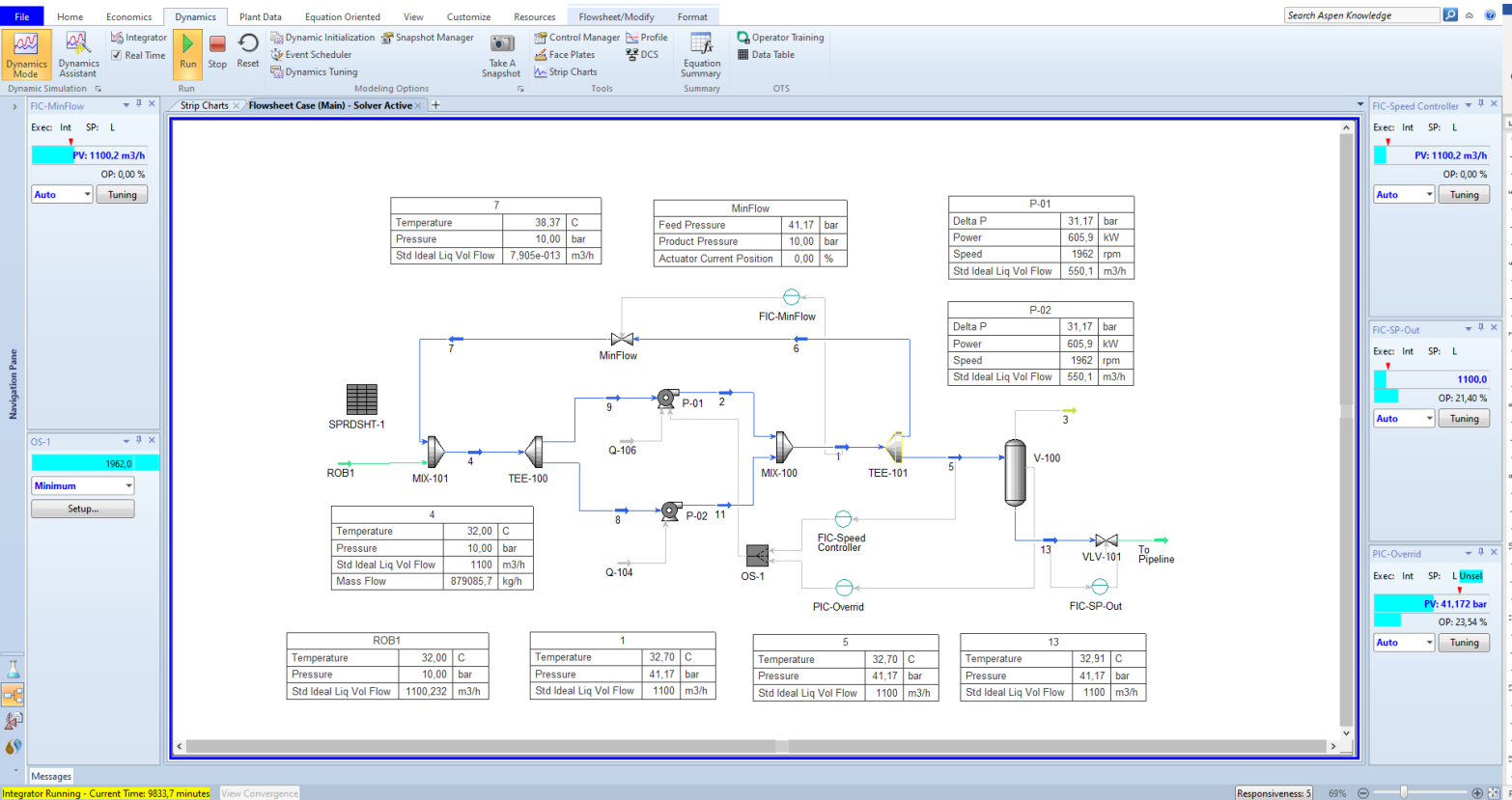


Figure 8. Simulation de la Station de Pompage

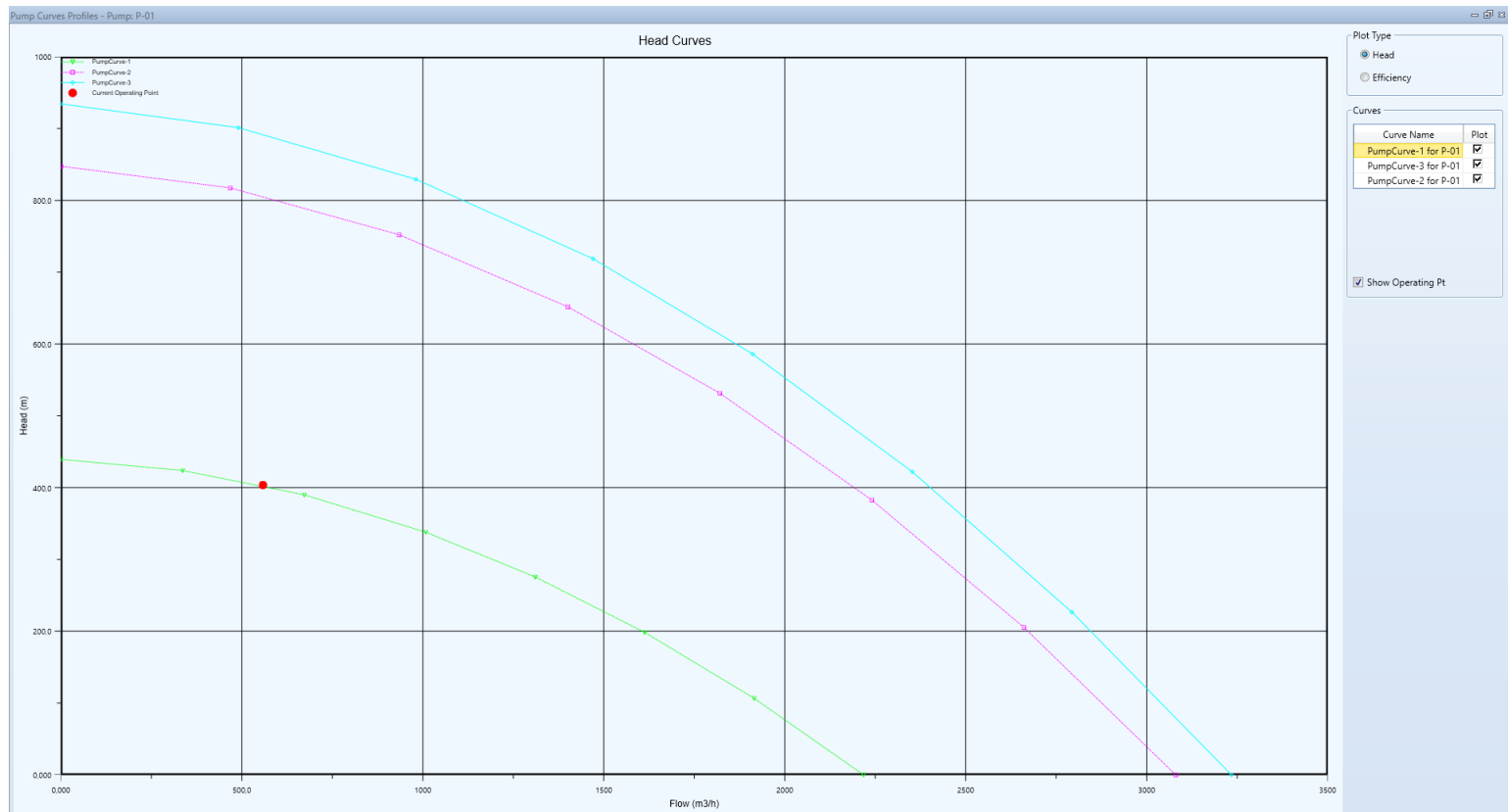


Figure 9. Profils de courbes de pompage

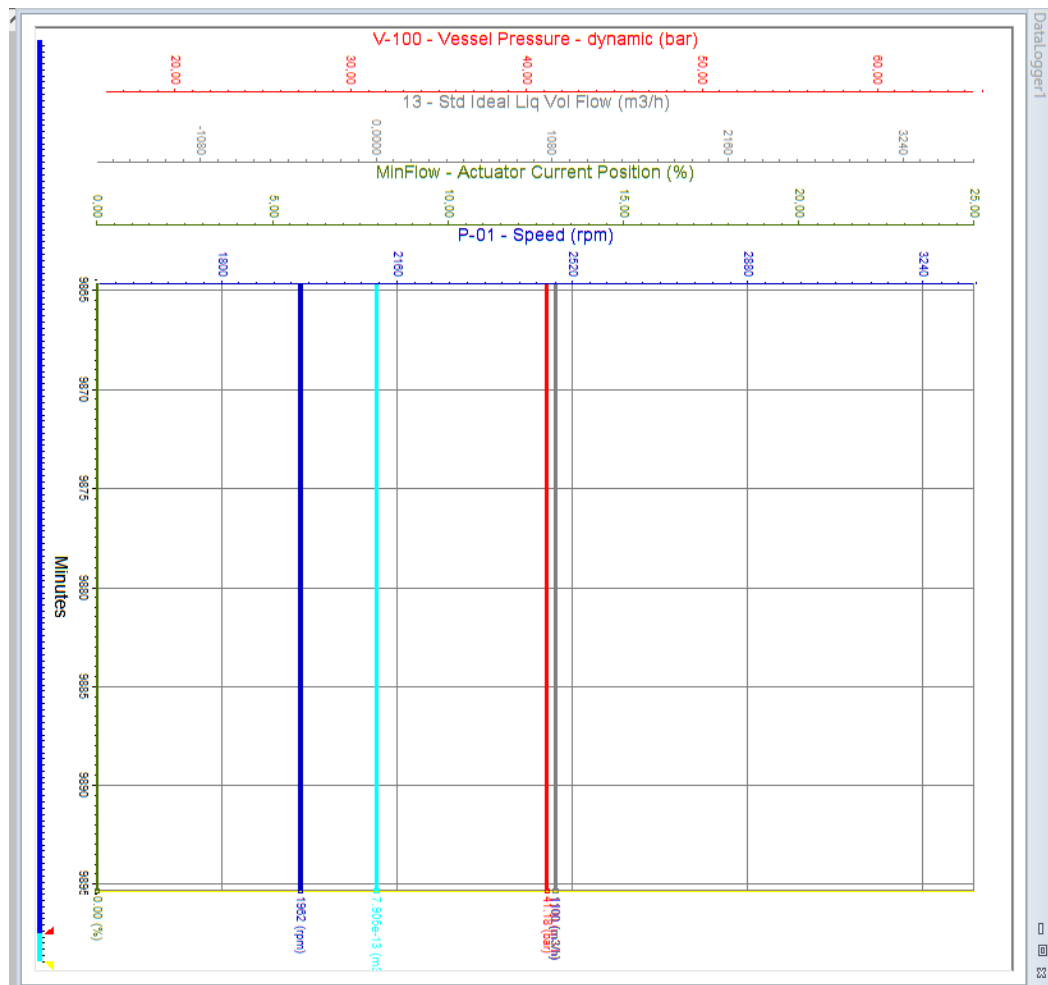


Figure 10. DATA Logger

PROGRAMMATION ET SUPERVISION AVEC TIA PORTAL V19 :

3.1.4. DESCRIPTION DU LOGICIEL TIA PORTAL V19 [13] :

Le Totally Integrated Automation Portal (TIA Portal) est une plateforme logicielle développée par Siemens pour la programmation, la configuration et la supervision des systèmes d'automatisation industrielle. La version V19 représente une évolution majeure, offrant des performances accrues, une meilleure ergonomie, et une intégration plus poussée des différents composants d'un projet d'automatisation.

TIA Portal permet de centraliser :

- La programmation des automates (PLC),
- La configuration des réseaux industriels,
- La supervision HMI/SCADA,
- Le diagnostic des systèmes.

3.1.5. LE GESTIONNAIRE DE PROJETS TIA PORTAL :

TIA Portal V19 dispose d'une interface unifiée qui regroupe tous les outils nécessaires à l'automatisation industrielle dans un environnement unique.

Le gestionnaire de projets permet de créer, gérer et structurer tous les composants d'un projet :

- Contrôleurs (PLC),
- Interfaces homme-machine (HMI),
- Variateurs (VFD),
- Réseaux de communication, etc.

Chaque projet peut contenir plusieurs configurations matérielles et logicielles, facilitant ainsi le développement, le test et la maintenance de systèmes complexes.

3.1.6. L'ORGANISATION DU PROGRAMME :

Le programme utilisateur est stocké dans l'automate sous forme de blocs :

- **Blocs d'organisation (OB)** : exécutés en fonction de leur priorité ou d'événements système (OB1 est le programme principal).
- **Fonctions (FC) et blocs fonctionnels (FB)** : permettent la programmation modulaire et réutilisable.
- **Blocs de données (DB)** : contiennent les données associées aux blocs fonctionnels ou aux variables globales.

La programmation dans TIA Portal est structurée et orientée objet, facilitant la maintenance et l'évolutivité des projets.

3.1.7. LES LANGAGES DE PROGRAMMATION :

TIA Portal V19 prend en charge plusieurs langages de programmation conformes à la norme IEC 61131-3 :

- **LAD (Ladder Diagram)** : langage à contacts, très utilisé en industrie.
- **FBD (Function Block Diagram)** : langage graphique basé sur les fonctions logiques.
- **STL (Statement List)** : langage textuel bas niveau, proche de l'assembleur.
- **SCL (Structured Control Language)** : langage structuré, proche du Pascal, pour les calculs complexes.
- **GRAPH** : langage de programmation séquentielle, adapté aux applications de type Grafset.
- **HiGRAPH** : langage graphique basé sur les réseaux de Petri.

Chaque langage est intégré dans l'environnement TIA avec :

- Un éditeur interactif,
- Une visualisation temps réel des valeurs,
- Des outils d'analyse de code.

3.1.8. LE SIMULATEUR S7-PLCSIM ADVANCED:

S7-PLCSIM Advanced permet de simuler le comportement d'un automate Siemens sans matériel physique. Il est totalement intégré à TIA Portal et permet :

- De tester le programme en ligne directement sur la simulation.
- De forcer les entrées/sorties pour simuler différents scénarios.
- De valider les fonctions de communication, y compris les liaisons HMI et Profinet.

Le simulateur est un outil précieux pour :

- Le débogage,
- La vérification fonctionnelle,
- La formation.

3.1.9. SUPERVISION AVEC WINCC (TIA PORTAL) :

Le module de supervision WinCC intégré dans TIA Portal (appelé WinCC Unified [14] ou WinCC RT Advanced) permet de créer des interfaces HMI professionnelles et évolutives.

Grâce à une intégration native avec les automates Siemens, il est possible de lier facilement les variables de l'automate à des objets graphiques :

- Voyants,
- Boutons,
- Jauges, etc.

3.1.10. AVANTAGES DE L'INTEGRATION TIA PORTAL :

- Unification des outils : un seul environnement pour le PLC, le HMI et la mise en réseau.
- Partage automatique des symboles et adresses entre les différentes parties du projet.
- Réduction des temps de configuration, des erreurs de saisie et des incohérences.
- Diagnostic centralisé des erreurs et messages système.

3.1.11. FONCTIONS DE WINCC DANS TIA PORTAL:

- Création d'écrans de supervision dynamiques.
- Configuration de recettes, graphes de tendances et archives de données.
- Paramétrage d'alarmes avec historique et acquittement.
- Support des scripts VBScript ou JavaScript pour des comportements personnalisés.
- Déploiement sur panels HMI Siemens ou sur PC industriels.

3.1.12. STRUCTURE D'UN SYSTÈME AUTOMATISÉ :

Un système est dit automatisé lorsque le processus qui permet de passer d'une situation initiale à une situation finale se fait sans intervention humaine et que ce comportement est répétitif. Un système automatisé réalise un certain nombre d'actions appelées « tâches ».

On distingue trois parties importantes dans un système automatisé :

- **Partie opérative**

C'est la partie qui permet d'exécuter les ordres qu'elle reçoit de la partie commande.

Elle regroupe :

- Les effecteurs,
- Les actionneurs et leurs pré-actionneurs,
- Les capteurs nécessaires au contrôle du déplacement des actionneurs et au contrôle de présence.

- **Partie commande**

Elle gère et organise l'enchaînement des actions et mouvements du système.

Elle comprend :

- Les composants destinés au traitement des signaux des capteurs de la machine (P.O.),
- Les capteurs opérateurs de la partie dialogue.

- **Partie relation (ou dialogue)**

Elle se compose de deux ensembles :

- Les visualisations et avertisseurs (pour fournir des informations à l'opérateur).
- Les capteurs opérateurs (comme les boutons-poussoirs, interprétés par l'automate).

3.1.13. L'ARCHITECTURE DE CONTROLE ET DE COMMANDE

L'architecture de contrôle et de commande comprend trois niveaux distincts, chacun ayant un rôle précis et pouvant communiquer avec les autres via un protocole de communication :

- **Niveau terrain**

Premier niveau de l'architecture, il comprend :

- Les capteurs et actionneurs de la machine.

- **Niveau automatisation**

Le niveau intelligent du système. Il comprend :

- L'automate programmable industriel (API/PLC).

- **Niveau supervision**

C'est le niveau supérieur de l'architecture, Il permet La surveillance du processus dans son ensemble.

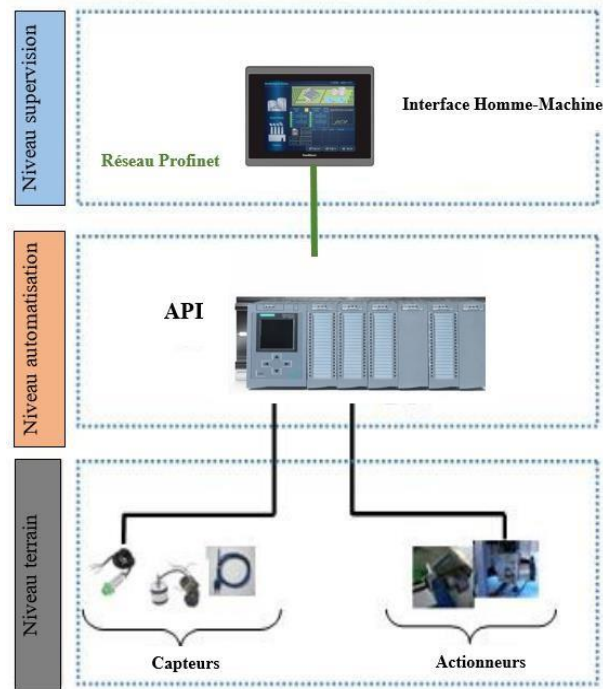


Figure 11. Architecture d'un système d'automatisation avec API, interface homme-machine, capteurs et actionneurs

3.2. SOLUTION HARDWARE

La partie **Hardware** correspond à la configuration physique du process.

On va donc dimensionner les différents équipements nécessaires, en choisissant les bonnes combinaisons entre automate, modules et alimentation.

3.2.1. CHOIX DE L'AUTOMATE :

Le choix de l'automate consiste à mettre en évidence les automates programmables disponibles sur le marché et l'objectif déjà défini, selon un cahier des charges.

La méthodologie consiste à sélectionner un automate programmable défini par ses caractéristiques, en fonction d'un certain nombre de critères :

- Le nombre des entrées/sorties ainsi que leurs types (Analogique, TOR...)
- La capacité de la CPU (sa taille mémoire, sa vitesse de traitement)
- Le nombre maximal des compteurs et temporisateurs
- Le temps de cycle de l'automate
- Les fonctions exclusives
- Les ports de communication qu'offre l'automate
- Le choix d'une marque reconnue mondialement
- Le coût

3.2.2. CHOIX DE LA CPU:

Pour la CPU, nous avons opté pour la gamme **S7-1500** de **Siemens**.

Ces automates offrent des **performances exceptionnelles** et une **grande flexibilité** pour les solutions de contrôle.

Plus précisément, nous avons choisi le modèle **S7-1500 1511-1-PN**, qui répond parfaitement à nos besoins en termes d'étendue du programme et de vitesse de traitement.

Grâce à cette CPU, il est possible de mettre en place une **architecture modulaire** en ajoutant des modules :

- D'entrées/sorties **TOR**,
- D'entrées/sorties **analogiques**,
- Ainsi qu'en intégrant divers **modules de communication** pour une connectivité optimisée.

Caractéristiques de la CPU :

- Référence : 6ES7 511-1AK00-0AB0
- Mémoire de travail : 150 Ko
- Port de communication : 2 ports Ethernet PROFINET
- Consommation en courant : 0.7 A / 24 V DC
- Pas d'entrées/sorties locales



Figure 12. CPU : 6ES7 511-1AK00-0AB0

3.2.3. LES MODULES D'ENTRÉES/SORTIES :

Pour effectuer le choix des différents modules d'**entrées/sorties (E/S)**, il est nécessaire de commencer par établir une **synthèse des capteurs et actionneurs** utilisés dans la station.

Ce recensement permet de **déterminer précisément le nombre et le type de modules** requis : analogiques ou tout-ou-rien (TOR).

3.2.4. TABLEAU DES CAPTEURS ET ACTIONNEURS

Tableau des capteurs :

Désignation	Élément	Nombre	Type	Signal de sortie
Capteurs	Transmetteur de pression	1	Analogique	4 – 20 mA / HART
	Transmetteur de débit	1	Analogique	4 – 20 mA / HART

Tableau 11. Tableau des capteurs

Tableau des actionneurs :

Désignation	Élément	Nombre	Type	Signal de sortie
Actionneurs	VFD principale	4	Analogique	4 – 20 mA / HART
	VFD booster	3	T.O.R	24 V DC
	Vanne de refoulement	4	Analogique	4 – 20 mA / HART
	Vanne de recyclage	4	Analogique	4 – 20 mA / HART

Tableau 12. Tableau des actionneurs

3.2.5. MODULE D'ENTRÉES ANALOGIQUES

AI 8×U/R/RTD/TC ST, qui possède 8 entrées analogiques :

Caractéristiques techniques :

- Référence : 6ES7531-7KF00-0AB0
- Tension d'alimentation : 24 V DC
- Nombre d'entrées : 8 entrées 16 bits
- Consommation en courant : 240 mA



Figure 13. Module analogique AI 8xU/I/R/RTD

3.2.6. MODULES DE SORTIES :

En ce qui concerne les sorties, nous avons :

- 32 sorties TOR
- 3 sorties analogiques

De ce fait, nous avons choisi les modules suivants :

- **DQ32x24 V DC/0.5A BA** (sorties TOR)
- **AQ 4xU/I ST** (sorties analogiques)

Caractéristiques techniques du module DQ32x24 V DC/0.5A :

- Référence : 6ES7522-1BL10-0AA0
- Tension d'alimentation : 24 V DC
- Nombre de sorties : 32

- Consommation en courant : 60 mA
- Tension de sortie : 24 V DC
- Courant de sortie : 0.5 A



Figure 14. DQ32x24 V DC/0.5A

Caractéristiques techniques du module AQ 4xU/I ST :

- Référence : 6ES7 532-5HD00-0AB0
- Tension d'alimentation : 24 V DC
- Nombre de sorties : 4
- Consommation en courant : 320 mA



Figure 15. AQ 4xU/I ST

3.2.7. MODULE D'ALIMENTATION :

3.2.7.1. BILAN DE CONSOMMATION EN COURANT :

Il est essentiel de choisir un module d'alimentation adapté pour alimenter le bus interne de l'automate S7-1500. Pour cela, un bilan de puissance des modules d'extension a été réalisé afin de déterminer les besoins en alimentation.

Bilan d'entrées/sorties :

Module	Nombre	Consommation totale (mA)
Module analogique AI 8xU/I/R/RTD	1	240
Module de sortie DQ32x24V DC	1	60
Module de sortie AQ 4xU/I ST	1	320
Panel IHM	1	1700
Total	4	2320 mA

Tableau 13. Tableau d'entrées/sorties

Caractéristiques du module PS 60W :

- Référence : 6ES7505-0RA00-0AB0
- Puissance dissipée : 60 W
- Courant d'entrée : 3 A
- Tension d'alimentation : 24 V DC
- Courant fourni : 2.5 A



Figure 16. PS 60W

3.3. SOLUTION LOGICIELLE PROPOSÉE

Dans le cadre de ce mémoire, le logiciel **TIA Portal** a été retenu comme solution logicielle principale pour la mise en œuvre des fonctionnalités de contrôle et de supervision de la station de pompage.

TIA Portal (*Totally Integrated Automation Portal*) est une plateforme avancée développée par Siemens, offrant :

- Une interface conviviale,
- Des outils puissants pour la configuration,
- La programmation des automates,
- Ainsi que la supervision des systèmes d'automatisation industrielle.

Cette plateforme permet notamment :

- La création de boucles de régulation personnalisées pour le contrôle précis des paramètres clés du processus, tels que la pression, la température et le débit,
- La configuration d'algorithmes de régulation sophistiqués,
- La visualisation des données en temps réel,

- Et la gestion des alarmes.

Langages de programmation utilisés :

- LAD (*Ladder Diagram*)
- SCL (*Structured Control Language*)

L'utilisation combinée des langages **Ladder** et **SCL** dans TIA Portal permet une programmation à la fois graphique et textuelle, assurant ainsi une grande polyvalence.

- Le langage **LAD** est particulièrement adapté à la configuration et à la visualisation des opérations logiques, facilitant la lecture et la maintenance du programme.
- Le langage **SCL**, quant à lui, offre une flexibilité accrue pour l'implémentation des algorithmes complexes de régulation.

Cette complémentarité permet d'optimiser les performances du système automatisé et de répondre efficacement aux exigences spécifiques de l'application industrielle.

3.3.1. FONCTIONNEMENT GLOBAL DES BOUCLES DE REGULATION :

La station de pompage SP1-ROB1 est conçue pour assurer le transport de pétrole brut dans un pipeline tout en maintenant un débit total conforme à la consigne (800m³/h à 2200m³/h) et une pression minimale de 70bar à la sortie. Le système intègre quatre pompes principales et trois pompes booster, chacune équipée d'un variateur de fréquence (VFD). Les boucles de régulation, implémentées dans TIA Portal V19 avec le contrôleur S7-1500 (référence 6ES7 511-1AK00-0AB0), permettent une gestion dynamique du débit et de la pression, tout en assurant la protection des équipements grâce à des alarmes et des séquences de recyclage. Cette section détaille l'architecture et le fonctionnement des boucles de régulation, en mettant l'accent sur leur intégration dans l'automate programmable.

3.3.2. ARCHITECTURE GENERALE DES BOUCLES DE REGULATION :

Les boucles de régulation sont structurées autour de plusieurs blocs fonctionnels (FB) programmés en SCL et de blocs de données (DB) dans TIA Portal V19. L'architecture repose sur les principes suivants :

- **Régulation du débit total** : Le débit total demandé (Q_{setpoint}) est atteint en ajustant dynamiquement le nombre de pompes actives et la vitesse de leurs VFD (de 0 à 100 % pour les pompes principales, 0 ou 100 % pour les pompes booster).
- **Régulation de la pression** : Une pression minimale de 70bar est maintenue à l'aide d'un mode boost qui augmente le débit de 10 % si la pression mesurée (P_{measured}) est inférieure à la consigne.
- **Alternance des pompes** : Une logique de rotation toutes les 7 jours (168h) équilibre l'usure des pompes principales en fonction de leurs heures de fonctionnement.
- **Gestion des alarmes** : Des seuils d'alarme surveillent le débit (ex. cavitation si $Q_{\text{mes}} < 120\text{m}^3/\text{h}$) et la pression (min 40bar, max 85bar).
- **Séquence de recyclage** : Une vanne de recyclage (FCV) et une vanne de refoulement (MRV) protègent chaque pompe contre la cavitation en suivant une séquence automatisée après démarrage.

Les variables sont organisées dans plusieurs blocs de données : DB_Global_Variables (variables globales), DB_Pump_Control (contrôle des pompes), DB_Pressure_Control (régulation pression), DB_Alarms (alarmes), DB_Timers (temporisations), et DB_Scaling (mise à l'échelle des signaux).

3.3.3. MISE A L'ECHELLE DES SIGNAUX ANALOGIQUES :

Les signaux analogiques provenant des capteurs (débitmètres et transmetteurs de pression) sont acquis via le module d'entrées analogiques (AI 8xU/R/RTD/TC ST, référence 6ES7531-7KF00-0AB0). Ces signaux, codés sur 16 bits (INT, 0 à 27648), sont normalisés et mis à l'échelle dans le bloc OB1 en Ladder à l'aide des instructions NORM_X et SCALE_X :

- **Normalisation** : La valeur brute (AI_Q_Total_Raw, AI_P_Asp_Raw, etc.) est convertie en une valeur normalisée entre 0.0 et 1.0 avec NORM_X (min = 0, max = 27648).
- **Mise à l'échelle** : La valeur normalisée est convertie en unités physiques (m3/h pour le débit, bar pour la pression).

Les résultats sont stockés dans DB_Global_Variables (Q_mes, P_aspiration, P_refoulement, Q_mes_P1, etc.) pour un traitement ultérieur.

3.3.4. CONTROLE DES POMPES PRINCIPALES ET BOOSTER :

Le contrôle des pompes est implémenté dans le bloc fonctionnel FB_Pump_Control (FB1), qui gère les scénarios fonctionnels suivants, basés sur le débit consigne (Q_setpoint) et la pression mesurée (P_measured) :

- **Scénario 1 (800m3/h à 1100m3/h)**
- **Scénario 2 (1100m3/h à 1400m3/h)**
- **Scénario 3 (1400m3/h à 1800m3/h)**
- **Scénario 4 (1800m3/h à 2200m3/h).**

3.3.5. RÉGULATION DE PRESSION :

Le bloc FB_Pressure_Control (FB3) régule la pression via une boucle PID optionnelle et un mécanisme de correction du débit

3.3.6. ALTERNANCE DES POMPES :

Le bloc FB_Pump_Rotation (FB2) gère l'alternance des pompes principales toutes les 168h (7 jours) pour équilibrer l'usure. La logique est basée sur les compteurs d'heures de fonctionnement (Hours_Counter_P1 à P4) dans DB_Timers :

- La pompe avec le moins d'heures devient la pompe leader (Current_Lead_Pump).
- Les autres pompes sont assignées dans un ordre cyclique (P1 → P2 → P3 → P4).
- Les temporisations sont gérées avec le type de données TIME (Rotation_Timer_P1 à P4).

3.3.7. GESTION DES ALARMES :

Le bloc DB_Alarms surveille les conditions critiques :

- **Alarme débit bas** : Déclenchée si $Q_{mes} < 120\text{m}^3/\text{h}$ (15 % de $800\text{m}^3/\text{h}$), indiquant un risque de cavitation.
- **Alarme débit haut** : Déclenchée si $Q_{mes} > 2300\text{m}^3/\text{h}$.
- **Alarme pression basse** : Déclenchée si $P_{refoulement} < 40\text{bar}$.
- **Alarme pression haute** : Déclenchée si $P_{refoulement} > 85\text{bar}$.
- **Alarme pression aspiration basse** : Déclenchée si $P_{aspiration} < 5\text{bar}$.
- **Alarme différentiel pression** : Déclenchée si la différence entre $P_{refoulement}$ et $P_{aspiration}$ dépasse 30bar .
- **Alarmes défaut pompes** : Déclenchées via les retours d'état (I_{Pump1_Fault} , etc.).

Chaque alarme est temporisée ($Alarm_Delay_Time = 5\text{s}$, $Q_Cavitation_Delay = 3\text{s}$, $P_Alarm_Delay = 2\text{s}$) pour éviter les déclenchements intempestifs.

3.3.8. SEQUENCE DE RECYCLAGE ET GESTION DES VANNES :

Après le démarrage d'une pompe, une séquence automatisée protège contre la cavitation :

1. Le débit est maintenu à $350\text{m}^3/\text{h}$ pendant 1min.
2. La vanne de refoulement (MRV) s'ouvre à 15% pendant 1min.
3. La MRV passe à 100%, et la vanne de recyclage (FCV) se ferme à 0%.

Cette séquence est gérée dans DB_Pump_Control avec les variables MRV_Sequence_Active, MRV_Step, et MRV_Timer_1Min (TIME).

3.3.9. CONFIGURATION DES RÉGULATEURS PID :

Chaque pompe principale dispose d'un régulateur PID individuel :

1. **Paramètres** :
 - **Setpoint (SP)** : $Q_Setpoint_P1$ (ou P2, P3, P4) depuis DB_Pump_Control.
 - **Process Value (PV)** : Q_mes_P1 (ou P2, P3, P4) depuis DB_Global.
 - **Output (OUT)** : VFD_1 (ou VFD_2, VFD_3, VFD_4) en pourcentage.
 - **Kp = 1.5, Ti = 5s, Td = 1s.**
2. **Appel** : Les régulateurs PID sont appelés dans OB30 (cycle d'interruption périodique, période = 100ms).

3.3.10. RÉPARTITION DE LA PROGRAMMATION :

Dans cette partie, nous présentons la démarche à suivre pour l’optimisation de la station de pompage SP1-ROB1 dans l’environnement TIA Portal V19, ainsi que les zones où sont sauvegardés l’ensemble des blocs de programme utilisés. Cette organisation garantit une structure modulaire et efficace pour l’automatisation de la station, en tenant compte des exigences spécifiques du domaine du transport

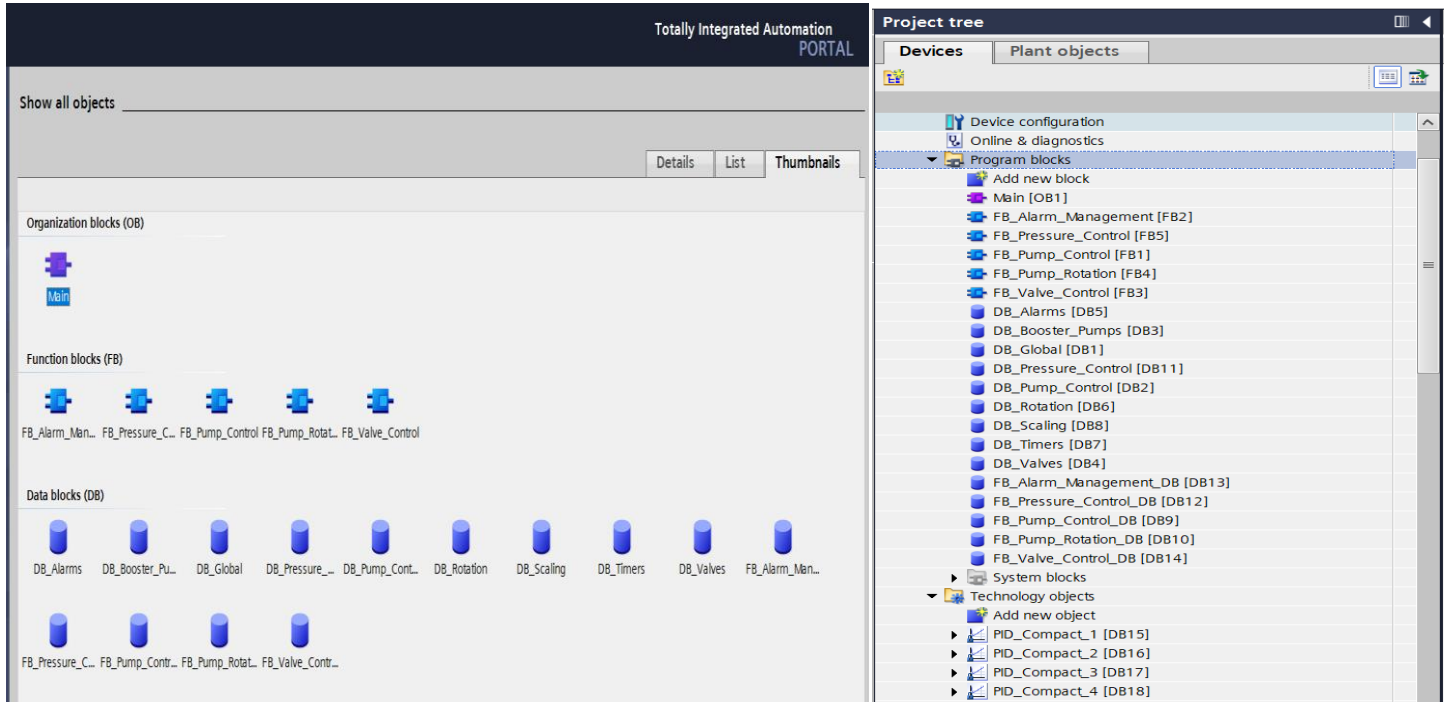


FIGURE 17. Vue Globale Des Blocs

3.3.11. DÉMARCHE DE PROGRAMMATION :

La programmation suit une approche structurée et itérative, les étapes détaillées sont les suivantes :

1. Configuration matérielle :

Dans TIA Portal V19, ajouter le CPU S7-1500 1511-1-PN (référence 6ES7 511-1AK00-0AB0)

2. Avec une mémoire de travail de 150kB et deux ports PROFINET.

3. Intégrer les modules d’entrées analogiques (AI 8xU/R/RTD/TC ST, référence 6ES7531-7KF00-0AB0), de sorties TOR (DQ32x24 V DC/0.5A BA, référence 6ES7522-1BL10-0AA0), et de sorties analogiques (AQ 4xU/I ST, référence 6ES7532-5HD00-0AB0),

4. Ainsi que le module d’alimentation PS 60W (référence 6ES7505-0RA00-0AB0). Affecter les adresses physiques aux entrées (%IW64 à %IW76) et sorties (%QW80 à %QW104).

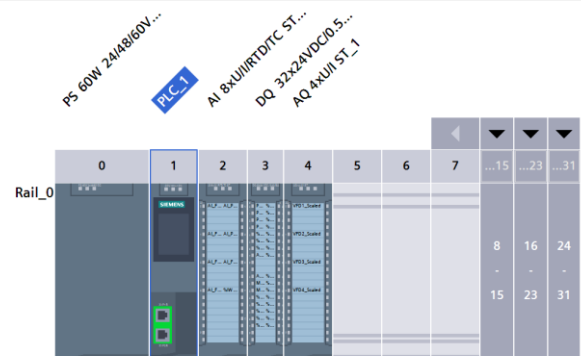


Figure 18. Configuration matérielle Dans Tia Portal

Table des Mnémoniques :

Les mnémoniques sont les noms que l'on attribue aux variables globales de l'automate, l'emploi des mnémoniques à la place des adresses absolues rend la compréhension du programme plus aisée, La Figure suivante illustre une partie de la table de mnémonique élaborée.

	Name	Tag table	Data type	Address	Retain	Acces...	Writa...	Visibl...	Supervision	...
1	AI_Flow_Pump1_Raw	Entrées Analogi...	Int	%IW0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
2	AI_Flow_Pump2_Raw	Entrées Analogiqu...	Int	%IW2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
3	AI_Flow_Pump3_Raw	Entrées Analogiqu...	Int	%IW4		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
4	AI_Flow_Pump4_Raw	Entrées Analogiqu...	Int	%IW6		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
5	AL_Pressure_Suction_Raw	Entrées Analogiqu...	Int	%IW8		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
6	AL_Pressure_Discharge_Raw	Entrées Analogiqu...	Int	%IW10		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
7	AI_Flow_TotaL_Raw	Entrées Analogiqu...	Int	%IW12		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
8	Pump1_Run	Sorties TOR (Slot 3 ...	Bool	%Q0.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
9	Pump2_Run	Sorties TOR (Slot 3 ...	Bool	%Q0.1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
10	Pump3_Run	Sorties TOR (Slot 3 ...	Bool	%Q0.2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
11	Pump4_Run	Sorties TOR (Slot 3 ...	Bool	%Q0.3		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
12	AO_VFD_Booster1	Default tag table	Int	%QW12		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
13	AO_VFD_Booster2	Sorties TOR (Slot 3 ...	Int	%QW14		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
14	AO_VFD_Booster3	Sorties TOR (Slot 3 ...	Int	%QW16		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
15	Alarm_Horn	Sorties TOR (Slot 3 ...	Bool	%Q0.7		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
16	Alarm_Light	Sorties TOR (Slot 3 ...	Bool	%Q1.0		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
17	MRV_Open	Sorties TOR (Slot 3 ...	Bool	%Q1.1		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
18	MRV_Close	Sorties TOR (Slot 3 ...	Bool	%Q1.2		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
19	VFD1_Scaled	Sorties Analogique...	Int	%QW4		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
20	VFD2_Scaled	Sorties Analogique...	Int	%QW6		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
21	VFD3_Scaled	Sorties Analogique...	Int	%QW8		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
22	VFD4_Scaled	Sorties Analogique...	Int	%QW10		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
23	AO_FCV1	Default tag table	Int	%QW18		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
24	AO_FCV2	Default tag table	Int	%QW20		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
25	AO_FCV3	Default tag table	Int	%QW22		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
26	AO_FCV4	Default tag table	Int	%QW24		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
27	AO_MRV_Position	Default tag table	Int	%QW26		<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		

FIGURE 19. Table des Mnémoniques Dans Tia portal

Création des Data Blocks (DB) :

Définir les blocs de données pour organiser les variables globales (DB_Global), les paramètres de contrôle des pompes (DB_Pump_Control), la régulation de pression (DB_Pressure_Control), la gestion des alarmes (DB_Alarms), les temporisations (DB_Timers), la mise à l'échelle (DB_Scaling), la rotation (DB_Rotation), et les vannes (DB_Valves).



Figure 20. Data Block dans Tia Portal

Développement des Function Blocks (FB) :

Programmer les blocs fonctionnels pour gérer les différentes fonctionnalités. Inclure :

- FB_Pump_Control pour le contrôle des pompes principales et booster,
- FB_Pump_Rotation pour l'alternance des pompes sur 7 jours,
- FB_Pressure_Control pour la régulation de pression,
- FB_Alarm_Management pour les alarmes,
- FB_Valve_Control pour la gestion des vannes de recyclage et de refoulement.

Ces blocs sont codés en SCL, avec des entrées/sorties mappées aux DB correspondants.

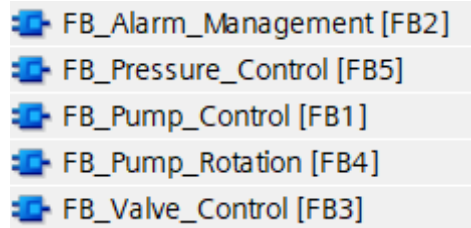


Figure 21. Function Blocks dans Tia Portal

Mise à l'échelle des capteurs :

Implémenter la normalisation et la mise à l'échelle des signaux analogiques dans OB1 en Ladder, en utilisant les instructions NORM_X et SCALE_X. Par exemple :

- Convertir les valeurs brutes des débitmètres (%IW64 à 27648) en 0m³/h à 2500m³/h,
- Convertir les valeurs des transmetteurs de pression en 0bar à 100bar.

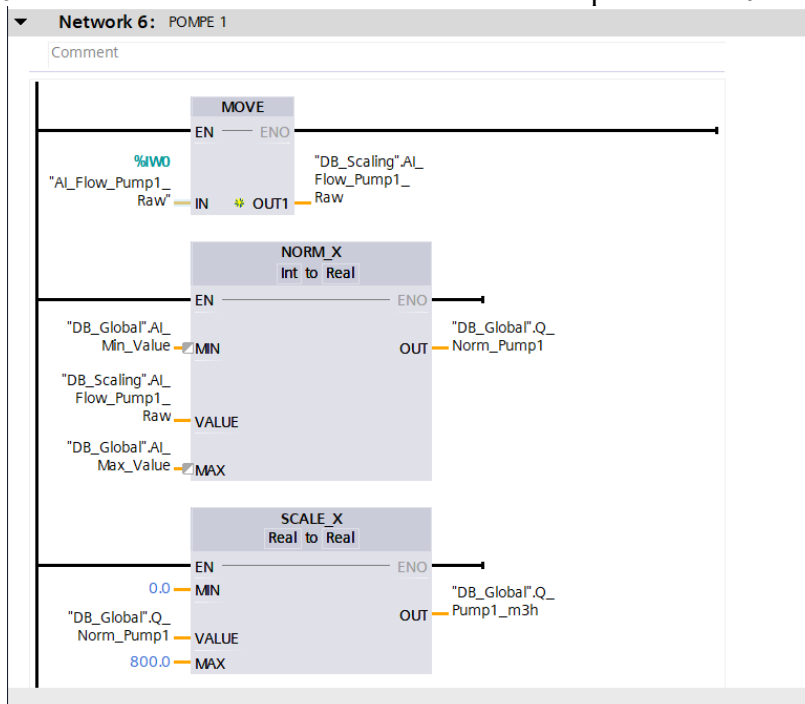


Figure 22. Mise à l'échelle Pompe 1

Table des Mnémoniques :

Les mnémoniques sont les noms que l'on attribue aux variables globales de l'automate, l'emploi des mnémoniques à la place des adresses absolues rend la compréhension du programme plus aisée, La Figure suivante illustre une partie de la table de mnémonique élaborée.

	Name	Tag table	Data type	Address	Retain	Acces...	Writa...	Visibl...	Supervision	...
1	AL_Flow_Pump1_Raw	Entrées Analogiqu...	Int	%IW0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
2	AL_Flow_Pump2_Raw	Entrées Analogiqu...	Int	%IW2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
3	AL_Flow_Pump3_Raw	Entrées Analogiqu...	Int	%IW4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
4	AL_Flow_Pump4_Raw	Entrées Analogiqu...	Int	%IW6	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
5	AL_Pressure_Suction_Raw	Entrées Analogiqu...	Int	%IW8	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
6	AL_Pressure_Discharge_Raw	Entrées Analogiqu...	Int	%IW10	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
7	AL_Flow_TotaL_Raw	Entrées Analogiqu...	Int	%IW12	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
8	Pump1_Run	Sorties TOR (Slot 3 ...	Bool	%Q0.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
9	Pump2_Run	Sorties TOR (Slot 3 ...	Bool	%Q0.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
10	Pump3_Run	Sorties TOR (Slot 3 ...	Bool	%Q0.2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
11	Pump4_Run	Sorties TOR (Slot 3 ...	Bool	%Q0.3	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
12	AO_VFD_Booster1	Default tag table	Int	%QW12	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
13	AO_VFD_Booster2	Sorties TOR (Slot 3 ...	Int	%QW14	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
14	AO_VFD_Booster3	Sorties TOR (Slot 3 ...	Int	%QW16	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
15	Alarm_Horn	Sorties TOR (Slot 3 ...	Bool	%Q0.7	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
16	Alarm_Light	Sorties TOR (Slot 3 ...	Bool	%Q1.0	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
17	MRV_Open	Sorties TOR (Slot 3 ...	Bool	%Q1.1	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
18	MRV_Close	Sorties TOR (Slot 3 ...	Bool	%Q1.2	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
19	VFD1_Scaled	Sorties Analogique...	Int	%QW4	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
20	VFD2_Scaled	Sorties Analogique...	Int	%QW6	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
21	VFD3_Scaled	Sorties Analogique...	Int	%QW8	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
22	VFD4_Scaled	Sorties Analogique...	Int	%QW10	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
23	AO_FCV1	Default tag table	Int	%QW18	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
24	AO_FCV2	Default tag table	Int	%QW20	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
25	AO_FCV3	Default tag table	Int	%QW22	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
26	AO_FCV4	Default tag table	Int	%QW24	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
27	AO_MRV_Position	Default tag table	Int	%QW26	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		

Figure 23. Table des Mnémoniques Dans Tia portal

Création des Data Blocks (DB) :

Définir les blocs de données pour organiser les variables globales (DB_Global), les paramètres de contrôle des pompes (DB_Pump_Control), la régulation de pression (DB_Pressure_Control), la gestion des alarmes (DB_Alarms), les temporisations (DB_Timers), la mise à l'échelle (DB_Scaling), la rotation (DB_Rotation), et les vannes (DB_Valves).

-  DB_Alarms [DB5]
-  DB_Booster_Pumps [DB3]
-  DB_Global [DB1]
-  DB_Pressure_Control [DB11]
-  DB_Pump_Control [DB2]
-  DB_Rotation [DB6]
-  DB_Scaling [DB8]
-  DB_Timers [DB7]
-  DB_Valves [DB4]

Figure 24. Data Block dans Tia Portal

Développement des Function Blocks (FB) :

Programmer les blocs fonctionnels pour gérer les différentes fonctionnalités. Inclure :

- FB_Pump_Control pour le contrôle des pompes principales et booster,
 - FB_Pump_Rotation pour l’alternance des pompes sur 7 jours,
 - FB_Pressure_Control pour la régulation de pression,
 - FB_Alarm_Management pour les alarmes,
 - FB_Valve_Control pour la gestion des vannes de recyclage et de refoulement.
- Ces blocs sont codés en SCL, avec des entrées/sorties mappées aux DB correspondants.

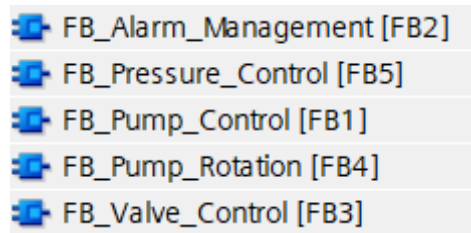


Figure 25. Function Blocks dans Tia Portal

Mise à l’échelle des capteurs :

Implémenter la normalisation et la mise à l’échelle des signaux analogiques dans OB1 en Ladder, en utilisant les instructions NORM_X et SCALE_X. Par exemple :

- Convertir les valeurs brutes des débitmètres (%IW64 à 27648) en 0m3/h à 2500m3/h,
- Convertir les valeurs des transmetteurs de pression en 0bar à 100bar.

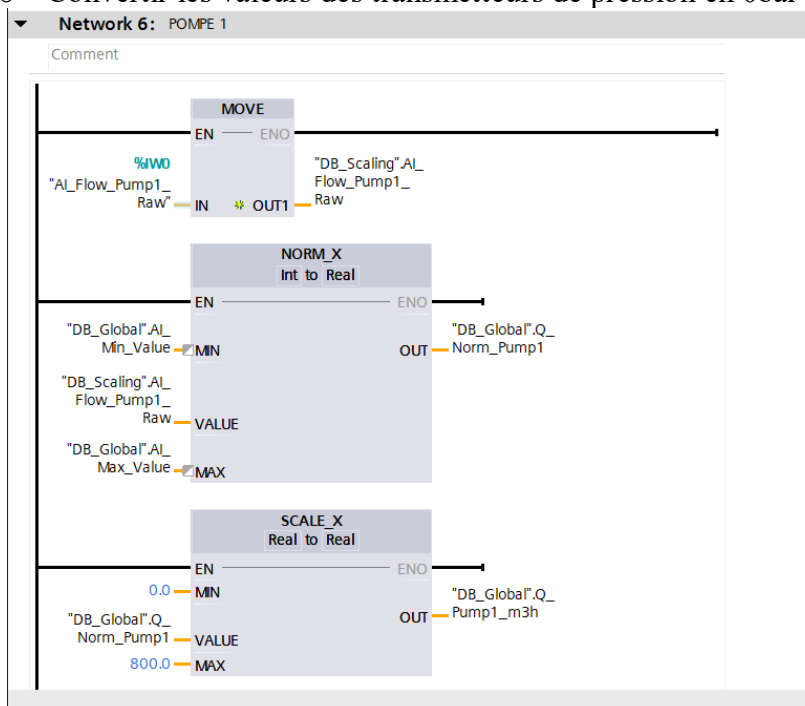


Figure 26. Mise à l’échelle Pompe 1

Intégration dans OB1 :

Appeler les FB dans le bloc principal OB1 en Ladder, en passant les paramètres depuis les DB (ex. DB_Global.Q_mes comme entrée pour FB_Pump_Control). Configurer des réseaux Ladder pour chaque appel, en reliant les PLC Tags aux variables internes.

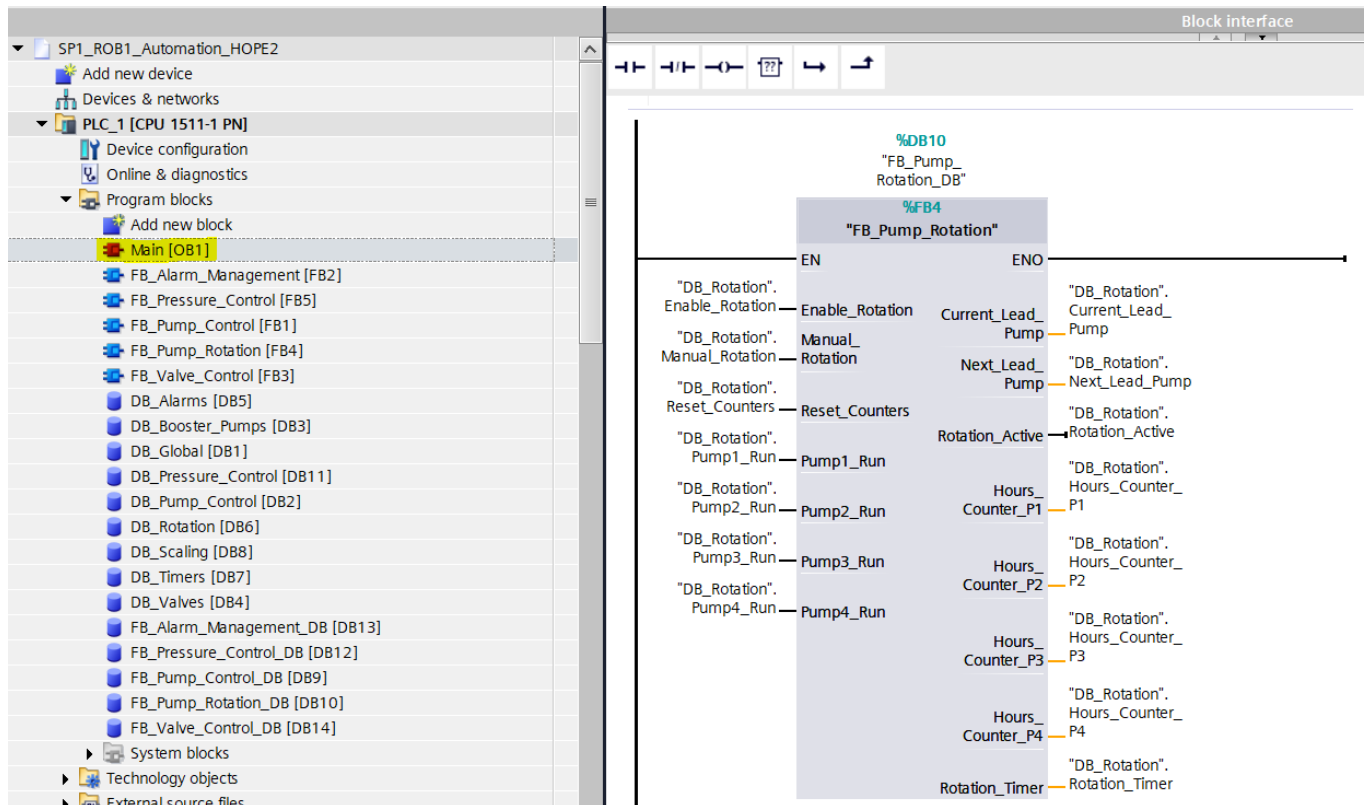


Figure 27. Intégration dans OB1 du FB_Pump_Rotation

3.3.12. ZONES DE SAUVEGARDE DES BLOCS DE PROGRAMME :

Les blocs de programme sont organisés et sauvegardés dans l'arborescence de **TIA Portal V19**, sous la section "**Program blocks**". La répartition est la suivante :

- **Function Blocks (FB)** : Sauvegardés dans le dossier "**Program blocks**" avec les numéros et noms suivants :
 - **FB1 – FB_Pump_Control** : Contrôle des pompes principales et booster.
 - **FB2 – FB_Pump_Rotation** : Gestion de l'alternance des pompes.
 - **FB3 – FB_Pressure_Control** : Régulation de la pression.
 - **FB4 – FB_Alarm_Management** : Gestion des alarmes.
 - **FB5 – FB_Valve_Control** : Contrôle des vannes de recyclage et de refoulement.

3.4. PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DES FUNCTION BLOCKS (FB) :

Dans cette section, nous détaillons le principe de fonctionnement de chaque **Function Block (FB)** développé dans **TIA Portal V19** pour la station de pompage **SP1-ROB1**. Ces blocs sont essentiels pour assurer le contrôle, la régulation et la supervision du système, en intégrant les exigences spécifiques du transport pétrolier. Chaque FB est décrit avec une organisation claire, incluant son objectif, son fonctionnement détaillé, et son interaction avec les **Data Blocks (DB)** et les entrées/sorties.

3.4.1. FB1 – FB_PUMP_CONTROL : CONTROLE DES POMPES PRINCIPALES ET BOOSTER :

Objectif :

Le bloc `FB_Pump_Control` est conçu pour gérer le fonctionnement des quatre pompes principales et des trois pompes booster de la station **SP1-ROB1**. Il ajuste dynamiquement le nombre de pompes actives, leurs vitesses via les **VFD**, et active la station **SP1-BIS** en fonction du débit consigne et de la pression mesurée.

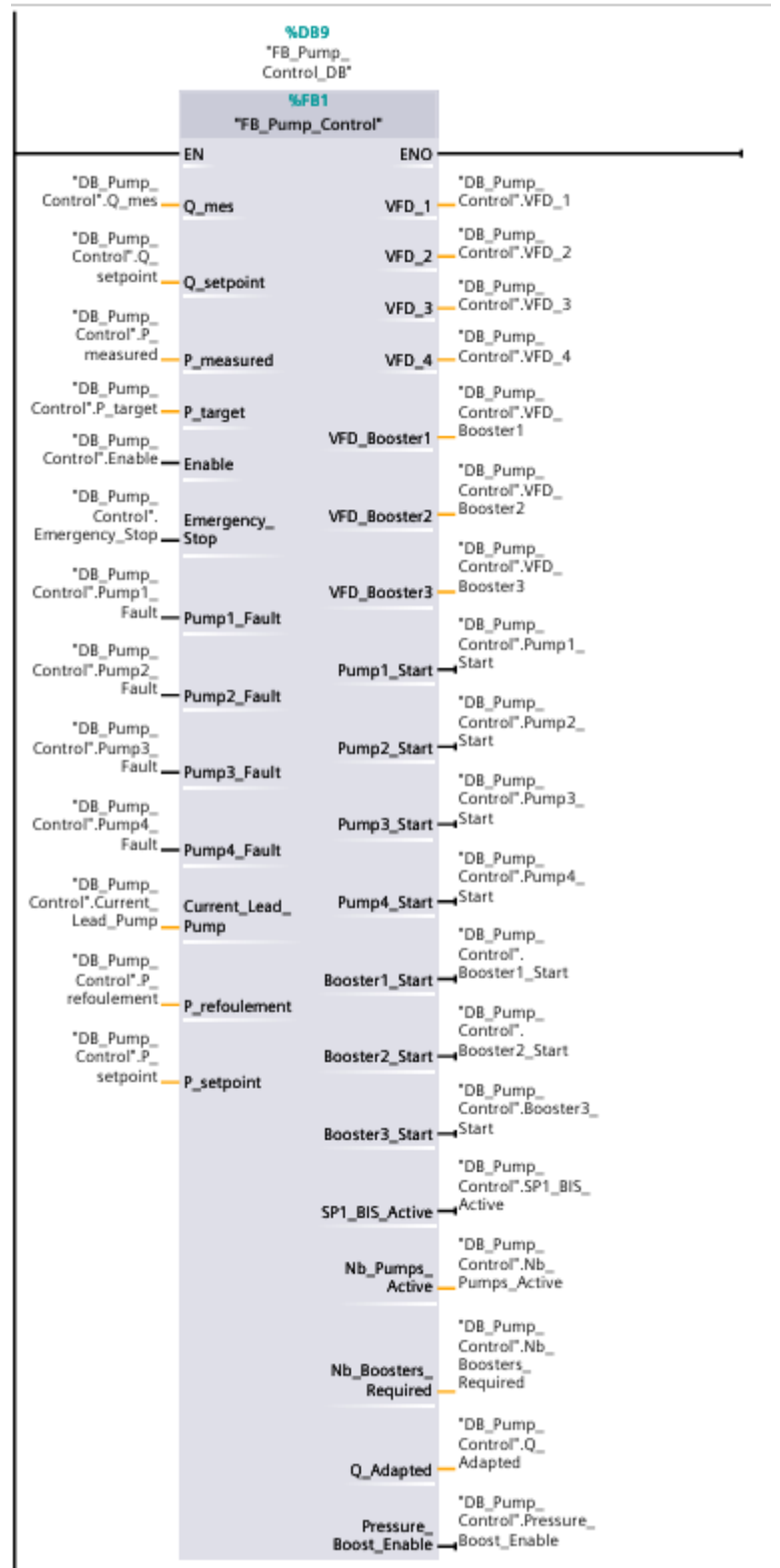
Fonctionnement détaillé :

1. **Entrées principales :** `Q_mes`, `Q_setpoint`, `P_measured`, `P_target`, `Enable`, `Emergency_Stop`.
2. **Logique de contrôle selon plages de débit (`Q_setpoint`) :**
 - $\leq 350 \text{ m}^3/\text{h}$: 1 pompe principale à 15 % + 1 booster à 100 %.
 - 350 à 800 m^3/h : 1 pompe principale proportionnelle ($\text{VFD}_1 = \text{Q_setpoint} * 100 / 800$) + 1 booster à 100 %.
 - 800 à 1100 m^3/h : 2 pompes principales ($\text{VFD}_1 = \text{VFD}_2 = \text{Q_setpoint} * 100 / 2200$) + 2 boosters à 100 %.
 - 1100 à 1400 m^3/h : 3 pompes principales ($\text{Q_setpoint} * 100 / 3300$) + 3 boosters.
 - 1400 à 1800 m^3/h et 1800 à 2200 m^3/h : 4 pompes principales ($\text{Q_setpoint} * 100 / 3200$) + 3 boosters + activation de SP1-BIS.
3. **Mode Boost:** si $\text{P_measured} < 70 \text{ bar} \rightarrow \text{Q_Adapted} = \text{Q_setpoint} * 1.10$.
4. **Sorties:** `VFD_1` à `VFD_4`, `VFD_Booster1` à `VFD_Booster3`, `PumpX_Start`, `BoosterX_Start`, `SP1_BIS_Active`.

5. Interaction avec DB : DB_Pump_Control, DB_Global_Variables.

Remarque : Les VFD sont limités à 100 %.

Figure 28. Le FB_Pump_Control



3.4.2. **FB2 – FB_PUMP_ROTATION : GESTION DE L’ALTERNANCE DES POMPES :**

Objectif :

Le bloc `FB_Pump_Rotation` assure l’alternance automatique des pompes principales toutes les **168 heures (7 jours)** pour équilibrer l’usure.

Fonctionnement détaillé :

1. **Entrées principales :** `Enable_Rotation`, `Manual_Rotation`, `Reset_Counters`.
2. **Logique de rotation :**
 - Timers `Rotation_Timer_P1` à `P4` → rotation après 168h.
 - Incrémentation toutes les heures (`Hour_Increment_Timer` ≥ 3600s).
 - Pompe avec le moins d’heures devient `Current_Lead_Pump`.
3. **Temporisations :** Gérées via `TIME` dans `DB_Timers`.
4. **Sorties:** `Current_Lead`, `Rotation_Active`.
5. **Interaction avec DB :** `DB_Timers`, `DB_Pump_Control`.

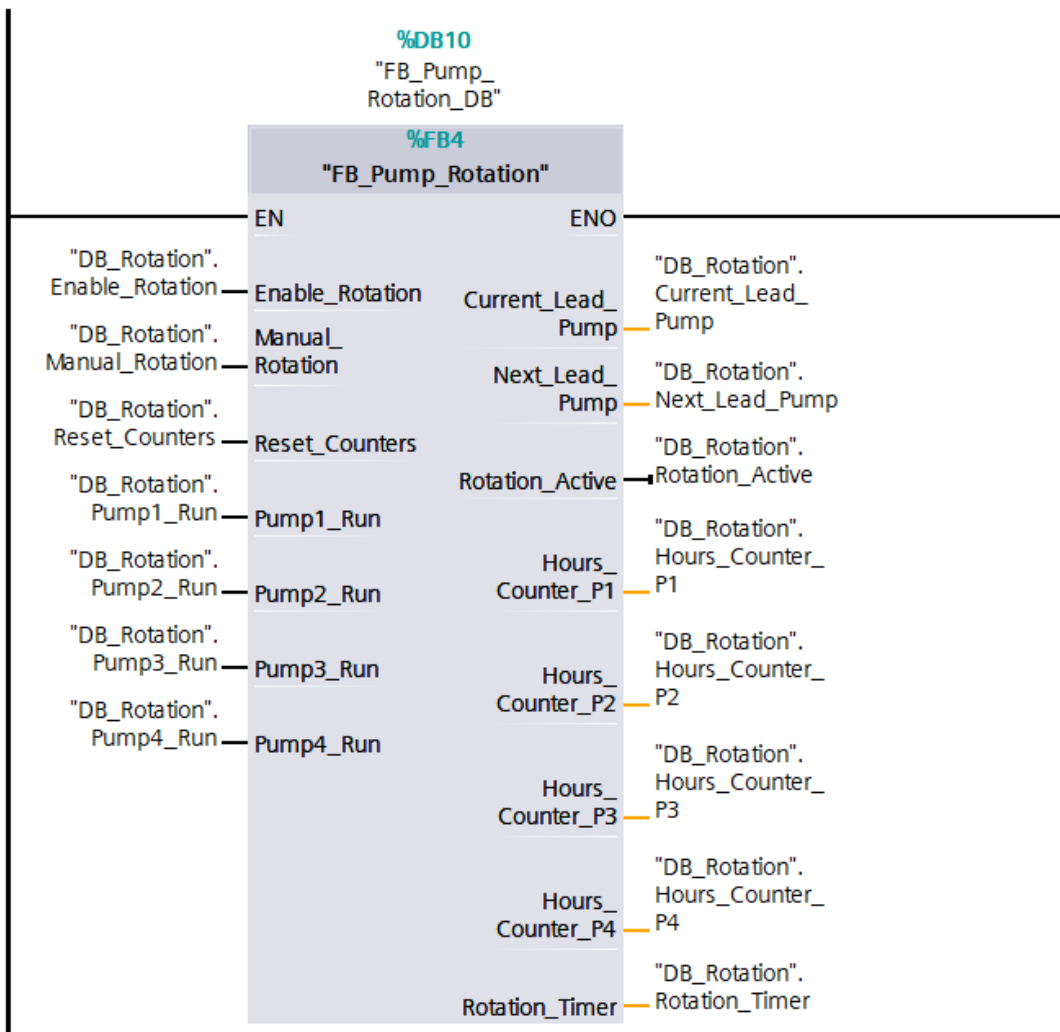


Figure 29. Le `FB_Pump_Rotation`

3.4.3. FB3 – FB_PRESSURE_CONTROL : REGULATION DE LA PRESSION

Objectif :

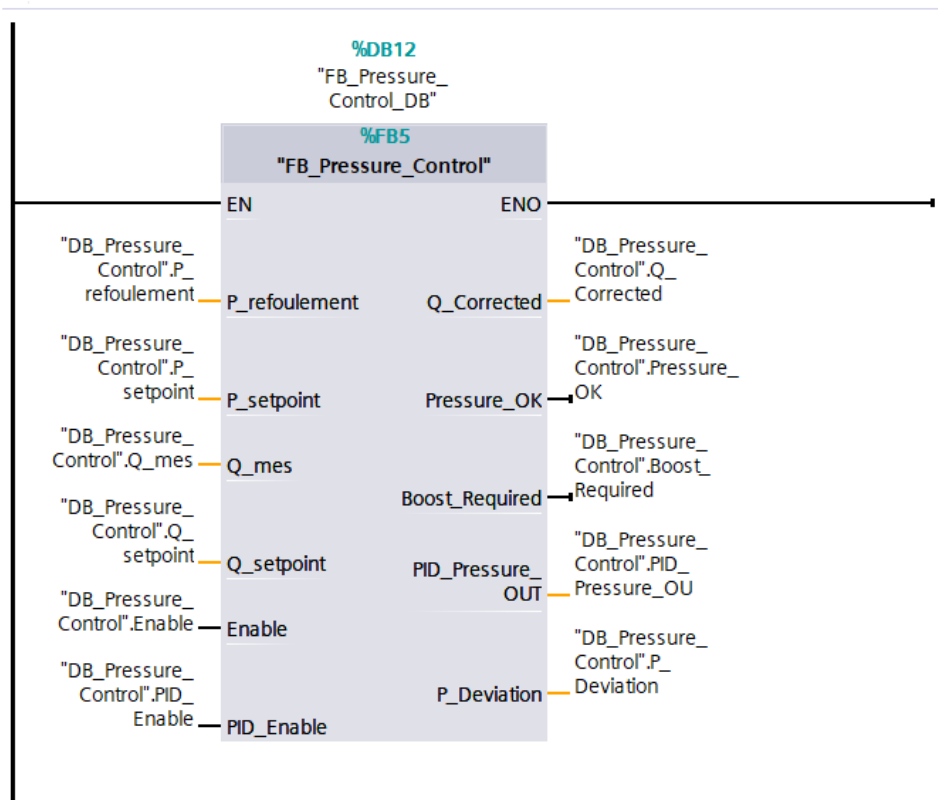
Le bloc FB_Pressure_Control régule la pression de refoulement à **70 bar**, avec ou sans PID, en ajustant dynamiquement le débit consigne.

Fonctionnement détaillé :

1. **Entrées principales:** P_Measured, P_Setpoint, Q_Measured, Q_Setpoint, Enable, PID_Enable.
2. **Logique :**
 - o $P_Error = P_Setpoint - P_Measured$.
 - o Si $P_Measured < 70 \text{ bar}$ → correction proportionnelle (+50 % max).
 - o Si PID_Enable → régulateur PID ($Kp=2.0$, $Ti=10s$, $Td=2s$).
 - o Sortie PID limitée ($\pm 50 \%$).
3. **Mode Boost :** Boost_Required activé si pression insuffisante.
4. **Sorties:** Q_Corrected, Pressure_OK, Boost_Required, PID_Output.
5. **Interaction avec DB :** DB_Pressure_Control.

Remarque : Limite haute du débit corrigé à 2400 m³/h.

Figure 30. Le FB_Pressure_Control



3.4.4. FB4 – FB_ALARM_MANAGEMENT : GESTION DES ALARMES

Objectif :

Le bloc FB_Alarm_Management surveille toutes les conditions critiques et déclenche les alarmes avec temporisation.

Fonctionnement détaillé :

1. **Entrées principales :** Q_mes, P_aspiration, P_refoulement, Q_mes_P1 à P4, I_PumpX_Fault.
2. **Logique de détection :**
 - o **Q_mes < 120 m³/h** → alarme cavitation (3s).
 - o **Q_mes > 2300 m³/h** → alarme surdébit (5s).
 - o **P_refoulement < 40 bar / > 85 bar** → alarmes pression (2s).
 - o **P_aspiration < 5 bar, ΔP > 30 bar** → alarmes différentielles.
 - o **Défauts pompes** via I_PumpX_Fault.
3. **Temporizations:** Alarm_Delay_Time, Q_Cavitation_Delay, P_Alarm_Delay.
4. **Sorties :** Alarm_Global_Active, Alarm_Q_Low, Q_Alarm_Horn, Q_Alarm_Light, etc.
5. **Interaction avec DB :** DB_Alarms.

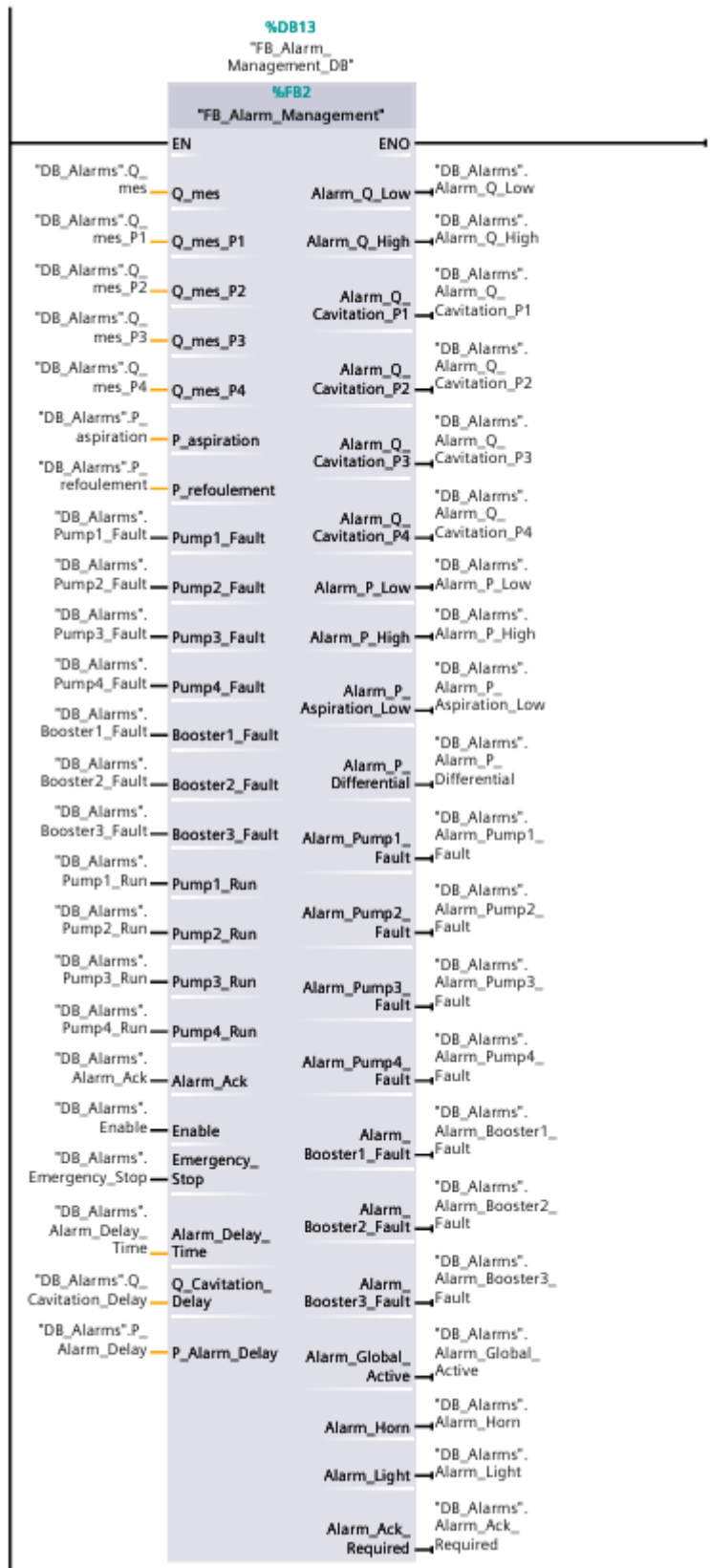


Figure 31. Le FB_Alarm_Management

3.4.5. FB5 – FB_VALVE_CONTROL : CONTROLE DES VANNES DE RECYCLAGE ET DE REFOULEMENT

Objectif :

Le bloc `FB_Valve_Control` est conçu pour gérer les **vannes de recyclage (FCV)** et la **vanne de refoulement (MRV)** associées aux pompes principales de la station **SP1-ROB1**. Son rôle principal est de **protéger les pompes contre la cavitation** en exécutant une **séquence automatisée** après leur démarrage, tout en maintenant un **débit minimum** et en ajustant les **positions des vannes** selon les conditions opérationnelles.

Fonctionnement détaillé :

1. Entrées principales :

- États de marche des pompes : `Pump1_Run` à `Pump4_Run`
- Débits mesurés par pompe : `Q_mes_P1` à `Q_mes_P4`
- Seuil de débit minimal : `Q_Min_Operation = 350 m³/h`
- Autorisation : `Enable`
- Arrêt d'urgence : `Emergency_Stop`

(Toutes ces valeurs proviennent de `DB_Global_Variables`)

2. Logique de séquence :

- Après démarrage d'une pompe (ex. `Pump1_Run = TRUE`) :
 - Le système attend que `Q_mes_P1 ≥ 350 m³/h`.
 - Une **séquence temporisée** est déclenchée :
 - **Étape 1** : `MRV_Position = 15 %` pendant 1 minute, `FCV = 0 %`.
 - **Étape 2** : `MRV_Position = 100 %`, `FCV = 0 %`.
- Chaque pompe dispose de sa propre logique via des timers (`MRV_Timer_1Min`) dans `DB_Timers`.

3. Protection cavitation automatique :

- Si `Q_mes_Px < 120 m³/h` (seuil cavitation) :
 - La vanne de recyclage correspondante (`Valve_Recycle_Px`) est ouverte à **100 %**.
 - Une alarme est déclenchée via le `FB_Alarm_Management`.

4. Sorties générées :

- Position des vannes de recyclage : `Valve_Recycle_P1` à `Valve_Recycle_P4` (**0–100 %**)
- Position de la vanne MRV : `MRV_Position` (**0–100 %**)
- Indicateur de séquence active : `MRV_Sequence_Active` (BOOL)

5. Interaction avec les DB :

- `DB_Pump_Control`: variables `MRV_Step`, `MRV_Timer_Enable`, `Recycle_Px_Required`, `MRV_Sequence_Active`
- `DB_Global_Variables` : positions actuelles des vannes → visualisation HMI

Remarque :

En cas de **signal d'arrêt d'urgence**, la séquence est **interrompue** immédiatement. Toutes les vannes retournent à leur **position de sécurité** :

- MRV_Position = 0 %
- FCV = 0 %

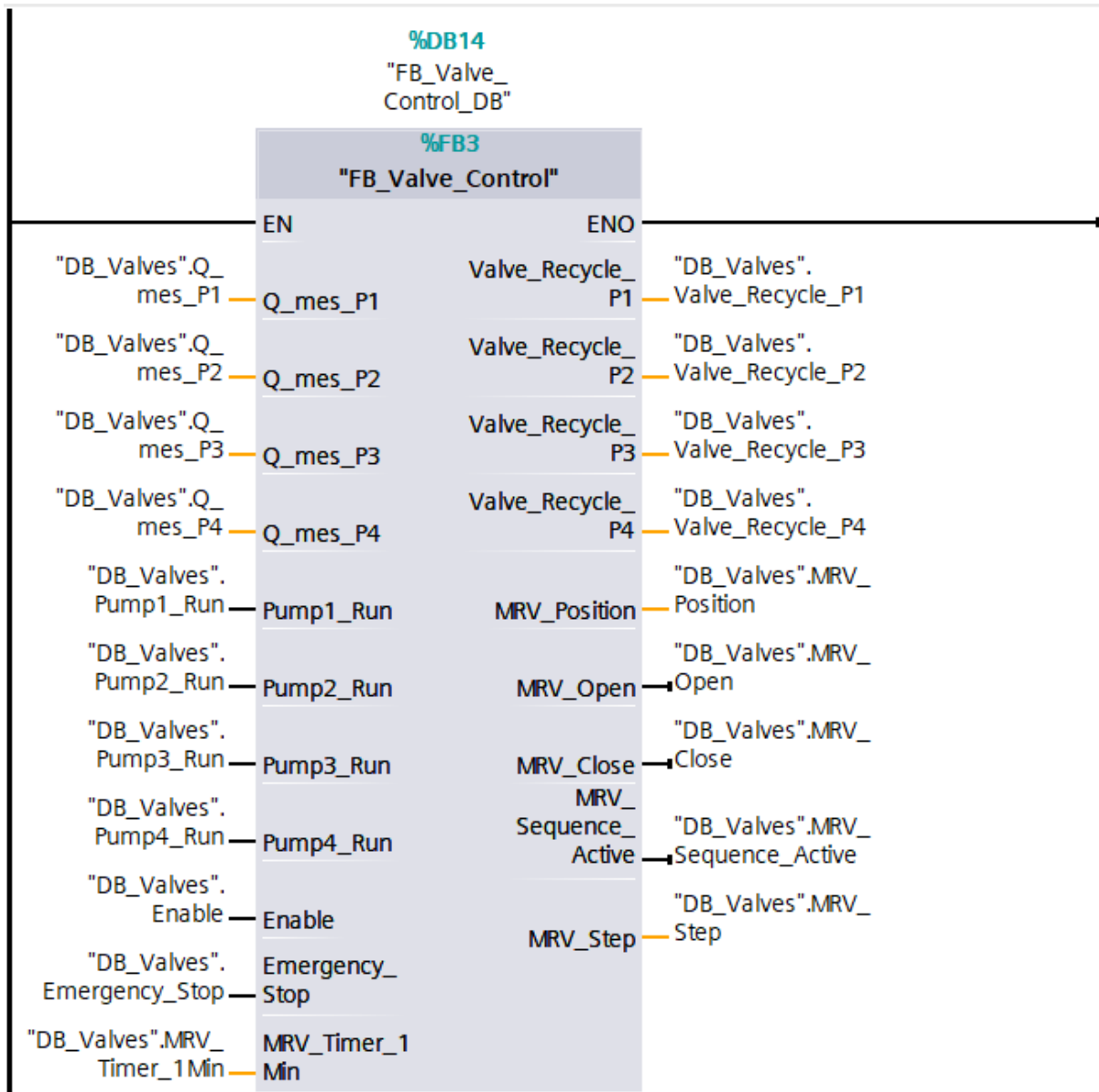


Figure 32. Le FB_Valve_Control

3.5. CONFIGURATION DE L’IHM :

Après avoir choisir le panel, nous avons établi une communication de type Profinet. La figure suivante montre la liaison entre l’IHM et la CPU.

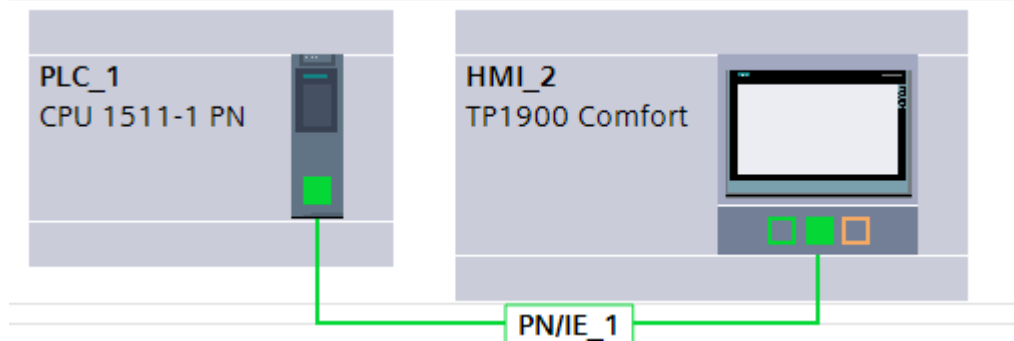


Figure 33. PLC /HMI Network Connection

Vue d’accueil :

C’est la vue initiale, elle apparait dès la mise en marche du système, elle permet d’accéder aux différentes vues du process.

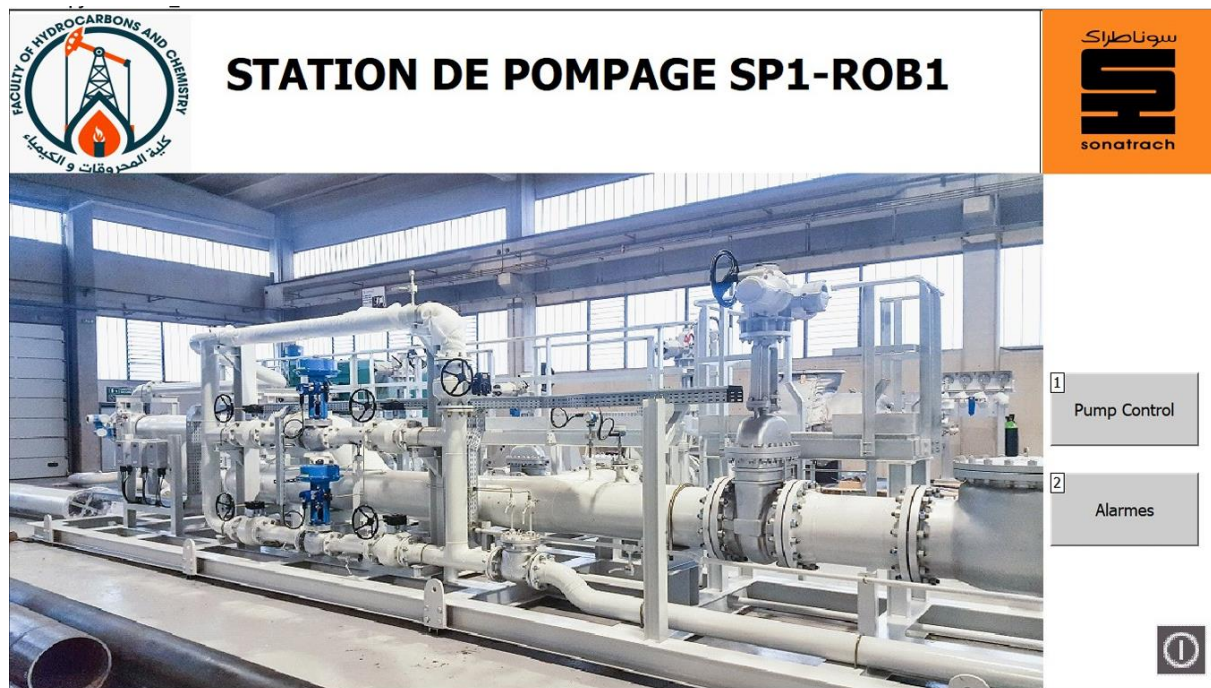


Figure 34. HMI vue Initiale

3.6. CONCLUSION DU CHAPITRE 3 : LOGICIELS DE SIMULATION ET D'AUTOMATISATION

Ce chapitre a mis en évidence l'importance des logiciels **Aspen HYSYS** et **TIA Portal V19** dans la conception, l'optimisation et l'automatisation de la station de pompage pétrolière SP1-HEH/R-OB1. Aspen HYSYS, avec ses modes stationnaire et dynamique, permet de simuler les procédés pour établir des bilans de matière et d'énergie, dimensionner les équipements et ajuster les paramètres en fonction des conditions opérationnelles. De son côté, TIA Portal V19 offre une plateforme unifiée pour programmer les automates SIMATIC S7-1500, configurer les interfaces HMI et superviser le système via WinCC, en utilisant des langages comme Ladder et SCL pour une régulation précise du débit, de la pression et de la vitesse des pompes. Les boucles de régulation, structurées autour de blocs fonctionnels (FB), intègrent des fonctionnalités avancées telles que l'alternance des pompes, la gestion des alarmes et la protection contre la cavitation, tandis que le matériel, incluant la CPU S7-1500 et les modules d'entrées/sorties, garantit une architecture robuste et modulaire. Ensemble, ces outils logiciels et matériels assurent une automatisation fiable et optimisée, répondant aux exigences du transport pétrolier. Ce chapitre conclut ainsi sur la complémentarité entre simulation et automatisation, formant une base solide pour l'exploitation efficace et sécurisée de la station.

| CONCLUSION GÉNÉRALE

CONCLUSION GÉNÉRALE

« Ce mémoire de fin d'études, consacré à l'optimisation de la station de pompage SP1-ROB1, a permis d'aborder les enjeux cruciaux liés à la régulation du débit et de la pression des pompes d'expédition de pétrole brut au sein de l'activité Transport par Canalisation (TRC) de Sonatrach. À travers une approche méthodique, ce travail a couvert l'analyse fonctionnelle et technique de la station, l'étude des systèmes d'instrumentation et de contrôle-commande, ainsi que la modélisation et la simulation des régulations à l'aide des logiciels **Aspen HYSYS** et **TIA Portal V19**.

Dans un premier temps, une présentation de **Sonatrach**, acteur majeur du secteur des hydrocarbures en Afrique, a été effectuée, mettant en lumière l'importance stratégique de la station SP1-ROB1. Située à Haoud El Hamra, cette station joue un rôle essentiel dans l'acheminement du pétrole brut vers les raffineries et les ports d'exportation. Avec une capacité de débit comprise entre 800 et 2200 m³/h, l'analyse détaillée de ses équipements – notamment les pompes booster et principales, les filtres et les manifolds – a permis de mieux cerner les exigences opérationnelles et les défis techniques liés à son fonctionnement.

Ensuite, le travail s'est orienté vers l'étude des **systèmes d'instrumentation et de contrôle-commande**, en détaillant les différents capteurs, transmetteurs, débitmètres et vannes utilisés pour surveiller et réguler les paramètres critiques. Une attention particulière a été portée aux régulateurs PID intégrés au système DCS, qui jouent un rôle déterminant dans la stabilisation du débit, de la pression et de la vitesse des pompes, tout en assurant la sécurité et l'efficacité énergétique. Les protocoles de communication industriels tels que **HART** et **Profinet** ont également été mis en avant pour leur contribution à une automatisation fiable et performante.

La dernière phase du mémoire s'est focalisée sur la **modélisation du procédé** à l'aide du logiciel Aspen HYSYS, dans le but d'optimiser les paramètres PID, ainsi que sur le développement d'un programme d'automatisation dans TIA Portal V19. Ce programme, articulé autour de blocs fonctionnels (FB) et de blocs de données (DB), gère plusieurs scénarios de fonctionnement (normal, recirculation, défaillance), tout en intégrant des fonctionnalités avancées telles que l'alternance automatique des pompes, la gestion intelligente des alarmes et la régulation dynamique des grandeurs physiques. De plus, une interface HMI configurée via **WinCC** permet une supervision en temps réel, facilitant le suivi et la maintenance des installations.

En conclusion, ce travail a permis de concevoir une solution d'automatisation robuste et performante pour la station SP1-ROB1, répondant efficacement à la problématique de stabilité des paramètres critiques tout en optimisant les performances globales de l'installation. Les résultats obtenus, validés par simulation, démontrent une nette amélioration de la fiabilité et de l'efficacité opérationnelle. Des pistes d'amélioration futures peuvent être envisagées, notamment l'intégration de **technologies prédictives pour la maintenance**, l'**optimisation énergétique** par des algorithmes avancés, ainsi que l'**extension du système à d'autres stations** du réseau TRC. Ce projet illustre ainsi l'importance stratégique de l'automatisation dans le secteur pétrolier et contribue à la modernisation des infrastructures de Sonatrach.»

Références bibliographiques

1. [01] Site officiel de SONATRACH. <https://www.sonatrach.dz>
2. [02] SONATRACH. Présentation institutionnelle, document interne "Presentation-SH-Fr.pdf", 2024.
3. [03] SONATRACH. Manuel d'exploitation SP1-ROB1, Réf. 1604-00-MAN-PR-8301, Rev A3.
4. [04] Siemens. PID Controller Basics, document technique, "07-PIDController.pdf".
5. [05] SONATRACH. Spécification SNCC SP1-ROB1, Réf. 0221-ROB1-INS-SG-005.
6. [06] SONATRACH. Spécification ESD SP1-ROB1, Réf. 0221-ROB1-INS-SG-006.
7. [07] SONATRACH. Système F&G SP1-ROB1, Réf. 0221-ROB1-INS-SG-007.
8. [08] National Instruments. Concept of SCADA Systems, document "Concept of SCADA system". Disponible sur <https://www.ni.com>.
9. [09] Rockwell Automation. Basics of PLCs, document "Basics of Programmable Logic Controllers PLC's". Disponible sur <https://www.rockwellautomation.com>.
10. [10] Siemens. Product overview for SIMATIC S7-1500, document "Product overview for SIMATIC S7-1500".
11. [11] ABB. Introduction to Variable Frequency Drives (VFDs), document "VFD Variable frequency drives". Disponible sur <https://new.abb.com>.
12. [12] Emerson. Types of Valves & Applications, document "types of Valves".
13. [13] Siemens. LEARN TIA Portal – Programming Guide, document "LEARN TIA PORTAL".
14. [14] Siemens. WinCC Unified Web Engineering Guide, document "WinCC Unified Web application".
15. [15] AspenTech. Getting Started with Aspen HYSYS. <https://www.aspentech.com>
16. [16] Endress+Hauser. PMD75 Specifications. <https://www.endress.com>
17. [17] FLEXIM. G800 Flowmeter Documentation. <https://www.flexim.com>
18. [18] Emerson. Rosemount Instrumentation Overview. <https://www.emerson.com>