الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي– تبسة

Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi –Tébessa

معـــــــــهد المـــــناجم

Institut des Mines et Geotechnologie

قسم المناجم والجيوتكنولوجيا

Département des Mines et de la Geotechnologie

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention d'un diplôme de Master Filière :

Electromécanique

Option : Electromécanique

Etude et Analyse de l'instabilité des systèmes de pression en milieu industriel (Sonatrach- Direction des GEM)

Présenté et soutenu par :

SELATNI Zakaria et BELGACEM Khaled

Devant le jury :

DAOUADI Rabah	*MCA*	*Président*	*Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi-Tébessa*
MELKIA Chaouki	*MCB*	*Encadreur*	*Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi-Tébessa*
ATTIA Moussa	*MCA*	*Examinateur*	*Université Echahid Cheikh Larbi Tebessi-Tébessa*

Promotion : 2024/2025


بسم الله الرحمن الرحيم

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي – تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد .....سلاطني زكرياء.....الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : .....طالـب جامعي

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : .....102831455..... و الصادرة بتاريخ .....2017/01/15..

المسجل بمعهد .....المنـــاجـــم..... قسم.....المناجم والجيوتكنولوجيا.....

و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها

Etude & Analyse de l'instabilité des systemes de pression en milieu industriel (Sonatrach-Direction des GEM)

أصرح بشرفي أني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

التاريخ:..2025/06/05.....

05 جوان 2025

لطفا إمضاء التعهد (ة) بخط اليد
الموقع أسفله

عن رئيس المجلس الشعبي البلدي
و بتفويض منه
إمضاء : العنصي حسام
نائب مديرية رئيس للإدارة الاقليمية

Scanné avec CamScanner

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

مؤسسة التعليم العالي : جامعة العربي التبسي – تبسة

تصريح شرفي
خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لانجاز بحث

أنا الممضي أدناه،

السيد .....بلقاسم خالد.....الصفة : طالب، أستاذ باحث، باحث دائم : .....طالـب جامعي

الحامل لبطاقة التعريف الوطنية رقم : .....107624055..... و الصادرة بتاريخ .....2018/01/29..

المسجل بمعهد .....المنـــاجـــم..... قسم.....المناجم والجيوتكنولوجيا.....

و المكلف بانجاز أعمال بحث (مذكرة التخرج، مذكرة ماستر، مذكرة ماجستير، أطروحة دكتوراه)، عنوانها

Etude & Analyse de l'instabilité des systemes de pression en milieu industriel (Sonatrach-Direction des GEM)

أصرح بشرفي أني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية و المنهجية و معايير الأخلاقيات المهنية و النزاهة الأكاديمية المطلوبة في انجاز البحث المذكور أعلاه.

05 جوان 2025

التاريخ:..2025/06/05.....

Scanné avec CamScanner

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Larbi Tebessi – Tébessa
Institut des Mines
Département mines et géotechnologie

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة العربي التبسي – تبسة
معهد المناجم
قسم المناجم و الجيوتكنولوجيا

Année universitaire : 2024/2025 Tébessa le : 05/06/2025

Lettre de soutenabilité

Noms et prénoms des étudiants :

1-SELATNI Zakaria

2-BELGACEM Khaled

Niveau : **Master** Option : **Électromécanique**

Thème : **Etude & Analyse de l'instabilité des systèmes de pression en milieu industriel (Sonatrach-Direction des GEM)**

Nom et prénom de l'encadreur : **MELKIA Chaouki**

Chapitres réalisés	Signature de l'encadreur
Introduction générale	Melkia Chaouki
Chapitre I : Présentation de la Direction des GEM	
Chapitre II : Présentation générale des systèmes de pression	
Chapitre III : La Régulation Automatique	
Chapitre IV : Présentation du syst de régulation de pression sur le site d'étude	
Chapitre V : Proposition et Mise en place d'une Solution Alternative	
Conclusion générale	

Scanné avec CamScanner

Remerciement

Je remercie avant tous ALLAH pour son aide, ses innombrables dons, ALLAH qui m'a donné la force, la volonté et le moral pour accomplir mes études.

Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants de l'Institut des mines

Et spécialement l'encadreur Mr. MELKIA Chaouki,

Qui ont contribué à notre formation.

Je remercie également l'ensemble des membres du jury pour avoir consacrer leur temps à examiner ce travail malgré leurs nombreuses responsabilités, je leur suis reconnaissant pour l'attention qu'ils ont porté à mon travail.

Enfin, Je tiens aussi à remercier ma famille et mes amis pour leur soutien Inconditionnel et leur présence continue.

Dédicace

L'homme a été trouvé sur la surface de la terre, et il n'a pas vécu isolé des autres humains.

À toutes les étapes de la vie, il y a des personnes qui méritent notre gratitude.

Les premières personnes à remercier sont les parents, car leur mérite atteint les cieux.

Leur présence est une cause de salut et de succès dans ce monde et dans l'au-delà.

À mes grands-parents et aux compagnons de lutte dans le parcours de la vie.

À mes frères, que je considère comme d'excellents compagnons dans toutes les circonstances.

SELATNI Zakaria

Dédicace

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chers frères, pour leur appui et leur encouragement,

A mes chères sœurs, pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fruit de votre soutien infaillible,

Merci d'être toujours là pour moi.

BELGACEM Khaled

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 Carte descriptive du passage des gazoducs GO1/GO2 et GO3……. 03

Figure I.2 Carte descriptive du passage des gazoducs vers le client…….. 04

Figure I.3 Gazoducs Hassi R'mel - Oued el Saf-Saf…….. 07

Figure I.4 Ecoulement renforcée par la station SC2 d'ain naga…….. 09

Figure I.5 Terminal Arrivée GEM……. 11

Chapitre III

Figure III.1 Clepsydre de *ktesibios* (-270 av. j.c., alexandrie)…….. 21

Figure III.2 Différents signaux relatifs à un système…… 24

Figure III.3 Réponse impulsionnelle d'un système du 1er ordre……..……. 27

Figure III.4 Système de régulation de manière générale…….. 29

Figure III.5 Régulation en boucle ouverte……..... 30

Figure III.6 Régulation en boucle fermée……... 31

Figure III.7 Représentation fonctionnelle d'une boucle de régulation…….. 32

Figure III.8 Schéma fonctionnel d'un régulateur……. 33

Figure III.9 Correcteur PID……... 35

Chapitre IV

Figure IV.1 Représentation d'équation de *Bernoulli*…….. 39

Figure IV.2 Architecture générale du système de régulation de pression sur le site d'étude 43

Figure IV.3 Araignée de câblage globale du projet……. 44

Figure IV.4 Schéma d'implantation des groupes de 5 PCV sur le site gazier…….. 45

Figure IV.5 Schéma d'implantation des pcv sur le site gazier…….. 46

Figure IV.6 Vanne de régulation (PCV)……... 47

Figure IV.7 Vue détaillée des composants d'une vanne PCV…….. 48

Figure IV.8 Vue détaillée des composants d'une vanne PCV…….. 49

Figure IV.9 Interface principale du programme de contrôle de pression ……..... 51

Figure IV.10 Fenêtre de suivi d'une vanne PCV…… 52

Figure V.11 Fenêtre de commande générale du système de régulation de pression……. 53

Figure V.12 Schéma des méthodes de contrôle pour la régulation de la pression……. 55

Figure V.13 Détaille de la fenêtre de suivi d'une vanne PCV…….. 57

Figure V.14 Variation de la pression de sortie en fonction du temps……..... 58
Figure V.15 Ecart entre la consigne PID et la position réelle d'une vanne PCV…….. 59
Figure V.16 Instabilité du débit du gaz en fonction du temps sous l'effet des PCV…..... 61

Chapitre V

Figure V.1 Graf Cet PIC 900……. 70
Figure V.2 Fenêtre de Configuration des Paramètres de Régulation de Pression..... 71
Figure V.3 Courbes représentent le comportement du système de régulation……... 74
Figure V.4 Système en pause pour éviter l'instabilité excessive…… 77
Figure V.5 Système en fonctionne normale avec prudence……. 78

Liste des tableaux

Tableau I.1 Capacité du gaz transporté des gazoducs GO1, GO2 et GO3……..……. 05

Tableau III.1 Formes de régulateur PID……..…… 36

Liste des abréviations

GEM Gazoducs Enrico Mattei « GO1/GO2/GO3 »

ENI Entreprise National Italienne

Cm3 Contrat mètre cube (un mètre cube de gaz à 1 bar et 15°C) ;

TD Terminal départ ;

TA Terminal arrivée

PID Proportionnel, Intégral, Dérivé

SC Station de Compression

PC Poste de coupure

PK Représente le point kilométrique de la canalisation à partir du terminal départ (PK0)

OESS Oued El Saf-Saf

SCADA Supervision Contrôle And Data Acquisition (Système de Contrôle et d'acquisition de données)

PCV Pressure Contrôle Valve (Vanne de régulation de pression)

PIC 900 Microcontrôleur

DELTA V Système d'Automation (Automate)

ROI Rentabilité et retour sur investissement

MANU Manuel

AUTO Automatique

Table de matières

Remerciement ……..... I
Dédicaces …… II
Dédicaces …… III
Liste des figures …….. IV
Liste des tableaux …….…….... VI
Liste des sigles et abréviations ……..…….. VII
Table des matières ….…… VIII
Introduction générale …….

CHAPITRE I

Présentation de la Direction des GEM

I.1. Introduction…… 02
I.2. Activité principale de l'entreprise…… ……..…. 03
I.2.1. Capacité de Transport…….. 05
I.2.2. Commercialisation……... 05
I.3. Creation de la direction des gazoducs gem……... 06
I.4. Description des ouvrages de l'entreprise……... 06
I.4.1. Terminal départ de HASSI R'MEL…… 07
I.4.2 Postes de coupure…… 07
I.4.3 La station de compression SC2 ……. 08
I.4.4 Vannes de ligne……... 09
I.4.5. Postes de purge…… 10
I.4.6. Postes de protection cathodique…….. 10
I.4.7. Le Terminal arrivée d'OUED El SAF-SAF « site d'étude » …….. 10
I.5. Conclusion…… 11

CHAPITRE II

Présentation générale des systèmes de pression

II.1. Introduction……... 12
II.2. Définition et notion fondamentales sur la pression…….. 13
II.2.1. Notion spécifique au gaz …… 14
II.2.1. Le rôle de la pression dans les systèmes de gaz…….. 14
II.3. Importance de la pression de gaz dans l'industrie……. 14
II.3.1. Composants d'un système de pression de gaz……. 15
II.4. Importance du contrôle de la pression en milieu industriel ……. 15
II.4.1. Risques liés à l'instabilité de la pression …… 16
II.4.2. Nécessité du contrôle de la pression…… 16
II.5. Composant d'un système de pression……... 17
II.5.1. Capteurs de pression……. 17
II.5.2. Soupapes et vannes……... 18

II.5.3. Régulateurs et actionneurs…… 18
II.5.4. Tuyauteries……... 18
II.6. Conclusion……..……... 19

CHAPITRE III

Le Régulation Automatique

III.1. Introduction……. 20
III.2. Objectif de régulation automatique……... 21
III.3. Principe de la régulation…… 22
III.3.1. Notions de base ……. 23
III.3.2. Modèle mathématique……..... 23
III.3.2.1. Fonction de Transfert…… 24
III.4. Caractéristiques d'un système asservi…….. 27
III.5. Principe de fonctionnement……... 27
III.5.1. Régulation en boucle ouverte (Manuelle)…… 28
III.5.2. La régulation en boucle fermée ……... 30
III.6. Représentation fonctionnelle d'une boucle de régulation…….. 31
III.6.1. Eléments constitutifs d'une boucle de régulation…...…….. 31
III.7. Classification des régulateurs……... 32
III.7.1. Pneumatique…….. 32
III.7.2. Electrique…….. 32
III.7.3. Electronique (numérique) ……. 32
III.8. La régulation PID…….. 33
III.8.1. Définition de régulateur PID…… 33
III.8.2. Structure d'un régulateur PID…….. 34
III.8.3. Principe de Régulation PID…….. 34
III.8.4. Fonctionnement et paramètres (Proportionnel, Intégral, Dérivé)……. 35
III.8.5. Formes de régulateur PID…… 35
III.8.6. Avantages et limites du PID……. 36
III.9. Conclusion……... 36

CHAPITRE IV

Présentation du système de régulation de pression sur le site d'étude

IV.1. Introduction……... 37
IV.2. Hydraulique générale de canalisations de fluides……. 37
IV.2.1. Calcul des pertes de charges dues aux frottements……. 37
IV.2.2. Equation de Bernoulli…….. 37
IV.2.3. Hydraulique du Gaz Naturel…… 40
IV.2.3. Equation Générale d'écoulement……. 40
IV.3. Description générale du système…… 41
IV.4. Fonctionnement du système……... 41
IV.5. Illustrations et schémas du système…… 41
IV.5.1. Architecture et composants du système…… 41

IV.5.2. Araignée de câblage globale du projet…… 42
IV.5.3. Schéma d'implantation des groupes de 5 PCV sur le site gazier…….. 44
IV.5.4. Vue détaillée des composants d'une vanne PCV……. 45
IV.5.5. Interface principale du programme de contrôle de la pression……. 49
IV.5.6. Fenêtre de suivi d'une vanne PCV……... 51
IV.5.7. Fenêtre de commande générale du système de régulation de pression…. 52
IV.6. Présentation de la problématique……. 53
IV.6.1. Description du système de pression…….. 53
IV.6.2. Principe de fonctionnement de système de régulation…….. 53
IV.6.2.1. Méthode de contrôle…….. 56
IV.6.2.1.1. Méthode de contrôle locale via le volant……... 56
IV.6.2.1.2. Méthode de contrôle à distance……. 56
IV.6.3. Fonctionnement du PID……... 57
IV.6.4. Identification du dysfonctionnement……... 59
IV.6.4.1. Conséquences techniques et économiques…… 59
IV.7. Conclusion…….. 61

CHAPITRE V

Proposition et Mise en place d'une Solution Alternative

V.1. Introduction…… 62
V.2. Élaboration et Implémentation d'une Solution Alternative pour la Stabilisation de la Pression……. 62
V.2.1. Analyse des besoins……. 62
V.2.2. Conception de la solution alternative…….. 62
V.2.3. Implantation de la solution…….. 63
V.3. Présentation détaillée du code……. 63
V.3.1. Défi majeur dans l'exploitation……... 64
V.3.2. Description détaillée du diagramme fonctionnel……. 64
V.3.3. Explication détaillée de chaque paramètre……. 66
V.3.4. Avantage attendus après le remplacement du PID ……... 70
V.3.4.1. Amélioration de la stabilité de la pression……... 70
V.3.4.2. Réduction des interventions humaines…… 71
V.3.4.3. Réduction de l'usure mécanique des vannes……..…… 71
V.3.4.4. Réactivité accrue en cas de perturbations…… 71
V.3.4.5. Optimisation des coûts d'exploitation……. 71
V.3.4.6. Sécurisations de la chaine d'approvisionnement……. 71
V.3.4.7. Flexibilité et adaptation au site…… 71
V.4. Analyses comparatives des résultats……... 72
V.4.1. Comparaison des performances PID vs Programme alternatif…… 72
V.4.2. Evaluation de la stabilité de la pression……... 73
V.5. Analyses et explication du comportement du système de régulation de pression……. 73

V.5.1. Une Expérience Complexe Nécessitant des Autorisations…… 74
V.5.2. Explication du Comportement Observé……... 74
V.5.3. Effet du Changement de Consigne et Influence de la Pression d'Entrée 75
V.5.4. Influence de la Pression d'Entrée sur le Comportement du Système….. 75
V.5.5. Conclusion...…… 76
V.6. Analyse économique de la solution proposée 77
V.6.1. Réduction des pertes de gaz et optimisation de la consommation énergétique…… 77
V.6.2. Réduction des coûts de maintenance et amélioration de la durée de vie des équipements……. 78
V.6.3. Impact sur la continuité du service et la satisfaction des clients 78
V.6.4. Rentabilité et retour sur investissement (ROI) ……... 79
V.7. Synthèse des résultats obtenus…… 79
V.7.1. Recommendations pour l'amélioration continue……..… 80
V.7.2. Perspectives d'évolution du système……... 80
V.8. Conclusion …….. 81
Conclusion générale ……...
Bibliographie

Table de matières

Remerciement... ……..... I
Dédicace...…… II
Dédicace …..…… III
Liste des figures …….. IV
Liste des tableaux …….…….... VI
Liste des sigles et abréviations ……..…….. VII
Table des matières…..…… VIII
Résumé
Introduction générale

CHAPITRE I

Présentation de la Direction des GEM

I.1. Introduction…… 02
I.2. Activité principale de l'entreprise…… ……..…. 03
I.2.1. Capacité de Transport…….. 05
I.2.2. Commercialisation……... 05
I.3. Creation de la direction des gazoducs gem……... 06
I.4. Description des ouvrages de l'entreprise……... 06
I.4.1. Terminal départ de HASSI R'MEL…… 07
I.4.2 Postes de coupure…… 07
I.4.3 La station de compression SC2 ……. 08
I.4.4 Vannes de ligne……... 09
I.4.5. Postes de purge…… 10
I.4.6. Postes de protection cathodique…….. 10
I.4.7. Le Terminal arrivée d'OUED El SAF-SAF « site d'étude » …….. 10
I.5. Conclusion…… 12

CHAPITRE II

Présentation générale des systèmes de pression

II.1. Introduction……... 13
II.2. Définition et notion fondamentales sur la pression……. 14
II.2.1. Notion spécifique au gaz ……. 15
II.2.1. Le rôle de la pression dans les systèmes de gaz……... 15
II.3. Importance de la pression de gaz dans l'industrie……. 15
II.3.1. Composants d'un système de pression de gaz……. 16
II.4. Importance du contrôle de la pression en milieu industriel ……... 16
II.4.1. Risques liés à l'instabilité de la pression …… 17
II.4.2. Nécessité du contrôle de la pression……..…. 17
II.5. Composant d'un système de pression……... 18
II.5.1. Capteurs de pression……. 18
II.5.2. Soupapes et vannes……... 19

II.5.3. Régulateurs et actionneurs…… 19
II.5.4. Tuyauteries……... 19
II.6. Conclusion……... 20

CHAPITREIII

Le Régulation Automatique

III.1. Introduction…… 21
III.2. Objectif de régulation automatique……... 22
III.3. Principe de la régulation…… 23
III.3.1. Notions de base ……. 24
III.3.2. Modèle mathématique……..... 24
III.3.2.1. Fonction de Transfert…… 25
III.4. Caractéristiques d'un système asservi…….. 28
III.5. Principe de fonctionnement……... 28
III.5.1. Régulation en boucle ouverte (Manuelle)…… 29
III.5.2. La régulation en boucle fermée ……... 31
III.6. Représentation fonctionnelle d'une boucle de régulation…….. 32
III.6.1. Eléments constitutifs d'une boucle de régulation…..…….. 32
III.7. Classification des régulateurs……... 33
III.7.1. Pneumatique…….. 33
III.7.2. Electrique…….. 33
III.7.3. Electronique (numérique) ……. 33
III.8. La régulation PID…….. 34
III.8.1. Définition de régulateur PID…… 34
III.8.2. Structure d'un régulateur PID…….. 35
III.8.3. Principe de Régulation PID…….. 35
III.8.4. Fonctionnement et paramètres (Proportionnel, Intégral, Dérivé)……. 36
III.8.5. Formes de régulateur PID…… 36
III.8.6. Avantages et limites du PID……. 37
III.9. Conclusion……... 37

CHAPITREIV

Présentation du système de régulation de pression sur le site d'étude

IV.1. Introduction……... 38
IV.2. Hydraulique générale de canalisations de fluides……. 38
IV.2.1. Calcul des pertes de charges dues aux frottements……. 38
IV.2.2. Equation de Bernoulli…….. 38
IV.2.3. Hydraulique du Gaz Naturel…… 40
IV.2.3. Equation Générale d'écoulement……. 41
IV.3. Description générale du système…… 42
IV.4. Fonctionnement du système……... 42
IV.5. Illustrations et schémas du système…… 42

IV.5.1. Architecture et composants du système…… 42
IV.5.2. Araignée de câblage globale du projet…… 43
IV.5.3. Schéma d'implantation des groupes de 5 PCV sur le site gazier…….. 45
IV.5.4. Vue détaillée des composants d'une vanne PCV…… 46
IV.5.5. Interface principale du programme de contrôle de la pression……. 50
IV.5.6. Fenêtre de suivi d'une vanne PCV……... 52
IV.5.7. Fenêtre de commande générale du système de régulation de pression…. 53
IV.6. Présentation de la problématique……. 54
IV.6.1. Description du système de pression…….. 54
IV.6.2. Principe de fonctionnement de système de régulation…….. 54
IV.6.2.1. Méthode de contrôle…….. 56
IV.6.2.1.1. Méthode de contrôle locale via le volant……... 56
IV.6.2.1.2. Méthode de contrôle à distance……. 56
IV.6.3. Fonctionnement du PID……... 57
IV.6.4. Identification du dysfonctionnement……... 59
IV.6.4.1. Conséquences techniques et économiques…… 60
IV.7. Conclusion…….. 62

CHAPITREV

Proposition et Mise en place d'une Solution Alternative

V.1. Introduction…… 63
V.2. Élaboration et Implémentation d'une Solution Alternative pour la Stabilisation de la Pression……. 63
V.2.1. Analyse des besoins……. 63
V.2.2. Conception de la solution alternative…….. 63
V.2.3. Implantation de la solution…….. 64
V.3. Présentation détaillée du code……. 64
V.3.1. Défi majeur dans l'exploitation……... 65
V.3.2. Description détaillée du diagramme fonctionnel……. 65
V.3.3. Explication détaillée de chaque paramètre……. 67
V.3.4. Avantage attendus après le remplacement du PID ……... 71
V.3.4.1. Amélioration de la stabilité de la pression……... 71
V.3.4.2. Réduction des interventions humaines…… 72
V.3.4.3. Réduction de l'usure mécanique des vannes……..…… 72
V.3.4.4. Réactivité accrue en cas de perturbations…… 72
V.3.4.5. Optimisation des coûts d'exploitation……. 72
V.3.4.6. Sécurisations de la chaine d'approvisionnement……. 72
V.3.4.7. Flexibilité et adaptation au site…… 72
V.4. Analyses comparatives des résultats……... 73
V.4.1. Comparaison des performances PID vs Programme alternatif…… 73
V.4.2. Evaluation de la stabilité de la pression……... 74

V.5. Analyses et explication du comportement du système de régulation de pression…. 74
V.5.1. Une Expérience Complexe Nécessitant des Autorisations……..…. 75
V.5.2. Explication du Comportement Observé……... 75
V.5.3. Effet du Changement de Consigne et Influence de la Pression d'Entrée 76
V.5.4. Influence de la Pression d'Entrée sur le Comportement du Système….. 76
V.5.5. Conclusion..…… 77
V.6. Analyse économique de la solution proposée 78
V.6.1. Réduction des pertes de gaz et optimisation de la consommation énergétique…… 79
V.6.2. Réduction des coûts de maintenance et amélioration de la durée de vie des équipements……. 79
V.6.3. Impact sur la continuité du service et la satisfaction des clients 80
V.6.4. Rentabilité et retour sur investissement (ROI) ……... 80
V.7. Synthèse des résultats obtenus…… 81
V.7.1. Recommendations pour l'amélioration continue……..… 81
V.7.2. Perspectives d'évolution du système……... 81
V.8. Conclusion …….. 82
Conclusion générale ……...
Bibliographie

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME DE

MASTER EN ELECTROMECANIQUE

SPECIALITE : ELECTROMECANIQUE

Proposé et dirigé par : **Dr. MELKIA Chaouki**

Présenté par : **SELATNI Zakaria e**t **BELGACEM Khaled**

Thème

Etude et Analyse l'instabilité des systèmes de pression en milieu industriel

(Sonatrach- Direction des GEM)

Résumé :

Dans notre cas d'étude, l'installation d'un système de régulation de pression basé sur le PID s'est avérée défaillante en raison de la détérioration de certaines vannes de régulation. Le remplacement de ces équipements représenterait un coût élevé pour l'entreprise, ce qui a conduit à la recherche d'une solution alternative. Cette étude vise ainsi à analyser les causes de l'instabilité de la pression, évaluer les performances du PID défaillant et proposer une solution de régulation logicielle capable de stabiliser la pression sans nécessiter un investissement important en matériel.

Ce travail s'articule autour des axes suivants :

Une présentation générale des systèmes de pression et des principes de régulation PID.

Une analyse détaillée de la problématique rencontrée et de ses conséquences techniques et économiques.

La proposition et l'implémentation d'une solution logicielle alternative.

Une comparaison entre les performances du PID et celles de la nouvelle solution.

À travers cette étude, nous chercherons à démontrer que l'innovation logicielle peut offrir des solutions efficaces pour pallier certaines défaillances matérielles, tout en assurant la stabilité des systèmes industriels de pression.

Mots clés : Maintenance, fiabilité, sécurité, disponibilité, sureté, système de régulation, capteurs, analyse de performance, Sécurité industrielle, évaluation des risques, Contrôle de processus, instrumentation industrielle,

Abstract:

In our case study, the implementation of a pressure regulation system based on PID control proved to be ineffective due to the deterioration of certain control valves. Replacing this equipment would incur significant costs for the company, which led to the search for an alternative solution. This study therefore aims to analyze the causes of pressure instability, evaluate the performance of the faulty PID controller, and propose a software-based regulation solution capable of stabilizing the pressure without requiring substantial hardware investment.

This work is structured around the following key points:

- A general overview of pressure systems and the principles of PID regulation.
- A detailed analysis of the identified problem and its technical and economic consequences.
- The proposal and implementation of an alternative software-based solution.
- A performance comparison between the PID controller and the new solution.

Through this study, we aim to demonstrate that software innovation can provide effective solutions to compensate for certain hardware failures, while ensuring the stability of industrial pressure systems.

ملخص:

في حالة الدراسة التي بين أيدينا، تبيّن أن نظام تنظيم الضغط المعتمد على التحكم PID غير فعّال بسبب تدهور بعض صمامات التنظيم. إن استبدال هذه المعدات يمثّل تكلفة مرتفعة بالنسبة للمؤسسة، مما دفع إلى البحث عن حل بديل. تهدف هذه الدراسة إلى تحليل أسباب عدم استقرار الضغط، وتقييم أداء وحدة PID المتعطلة، واقتراح حل برمجي قادر على تحقيق استقرار الضغط دون الحاجة إلى استثمار كبير في العتاد.

يرتكز هذا العمل على المحاور التالية:

عرض عام لأنظمة الضغط ومبادئ تنظيم.PID

تحليل مفصل للإشكالية التقنية وتبعاتها الفنية والاقتصادية.

اقتراح وتنفيذ حل بديل يعتمد على البرمجيات

من خلال هذه الدراسة، نسعى إلى إثبات أن الابتكار البرمجي يمكن أن يوفر حلولاً فعّالة لتعويض بعض الأعطال
مقارنة بين أداء PID والحل الجديد المقترح الميكانيكية، مع ضمان استقرار أنظمة الضغط الصناعية

Introduction Générale

Introduction générale

Dans les milieux industriels, les systèmes de pression jouent un rôle crucial dans le bon fonctionnement des installations. Le maintien de la pression à des niveaux optimaux est indispensable pour garantir la sécurité des équipements, assurer la continuité des opérations et optimiser la production. Une pression instable peut entraîner des dysfonctionnements majeurs, des pertes économiques considérables et des risques pour le personnel.

Pour contrôler la pression, les entreprises font souvent appel à des systèmes automatisés de régulation, parmi lesquels figure le régulateur PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé). Ce dernier est reconnu pour sa capacité à ajuster en temps réel la pression en fonction des écarts constatés par rapport à une valeur de consigne. Cependant, l'efficacité du PID dépend fortement de l'état des composants mécaniques et de la précision des capteurs.

Chapitre I

Présentation de la Direction GEM

I.1.Introduction

L'évolution de l'industrie dans tous les domaines a engendré une augmentation de la demande en énergie année après année, principalement les hydrocarbures.

Ces derniers restent toujours les sources d'énergie les plus demandées, ce qui oblige les producteurs à améliorer leurs capacités concernant la production, stockage et le transport des hydrocarbures.

Le gaz naturel est parmi les produits hydrocarbures les plus recherchés par les consommateurs d'énergies propres et moins chères, l'Algérie autant que pays producteur et exportateur de cette énergie, a investi ces dernières années dans ce domaine, et parmi ces projets ambitieux et stratégique ; l'exportation du gaz naturel par canalisations, Cet ouvrage traversant la méditerranée est le premier du genre lancé par SONATRACH. L'idée de construire une canalisation reliant l'Afrique du Nord à l'Italie exprimée par la société italienne ENI remonte au début des années 70. Sonatrach et ENI, après de longues discussions et pour des considérations historiques et stratégiques ont abouti le 22 octobre 1977 à un accord pour le financement et la construction de la canalisation.

ENI voulait assurer la sécurité de ses approvisionnements énergétiques qui dépendaient seulement de l'ex URSS et des Pays-Bas. La SONATRACH de son côté, voulait renforcer encore plus ses relations avec l'ENI.

L'ouvrage, qui traverse le Sahara algérien dans la direction du cap Bon en Tunisie, émerge en Sicile de part et d'autre, parcourt toute la Botte italienne avant de rejoindre par la suite la Slovénie, sur une longueur de 2 484 km. La distance que l'ouvrage parcourt sous la mer est de 170 km avec une profondeur maximale de 610 mètres.

Pour la partie algérienne, les gazoducs Enrico Mattei " GEM, GO1/GO2 d'un diamètre de 48" chacun s'étend sur une longueur de 549 km de Hassi R'mel à Oued Saf-Saf et transitent par les wilayas de Laghouat (Terminal départ), passant par Djelfa, Biskra (station de compression à Ain Naga SC2), Khenchela, El Oued et enfin Tébessa (terminal arrivée).

I.2.Activité principale de l'entreprise

La Direction des Gazoducs Enrico Mattei assure le transport du gaz naturel via les canalisations GO1, GO2 et GO3, depuis Hassi R'mel jusqu'à la frontière tunisienne, en vue de son exportation vers l'Italie. Elle a également pour mission la gestion du terminal d'arrivée Oued Saf-Saf (OESS), la livraison du gaz aux marchés national (SONELGAZ) et international, ainsi que la coordination, la maintenance et la sécurisation des infrastructures, incluant la station de compression de Aïn Naga.

Ses missions s'articulent autour des axes suivants :

• Assurer l'exploitation du tronçon algérien des gazoducs Enrico Mattei ;

• Gérer les livraisons commerciales de gaz naturel selon les contrats établis ;

• Coordonner avec les centres opérationnels de Hassi R'mel, Cap Bon et Milan ;

• Veiller à la maintenance, la sécurité et la protection des installations ;

• Superviser les fonctions administratives, financières et logistiques.

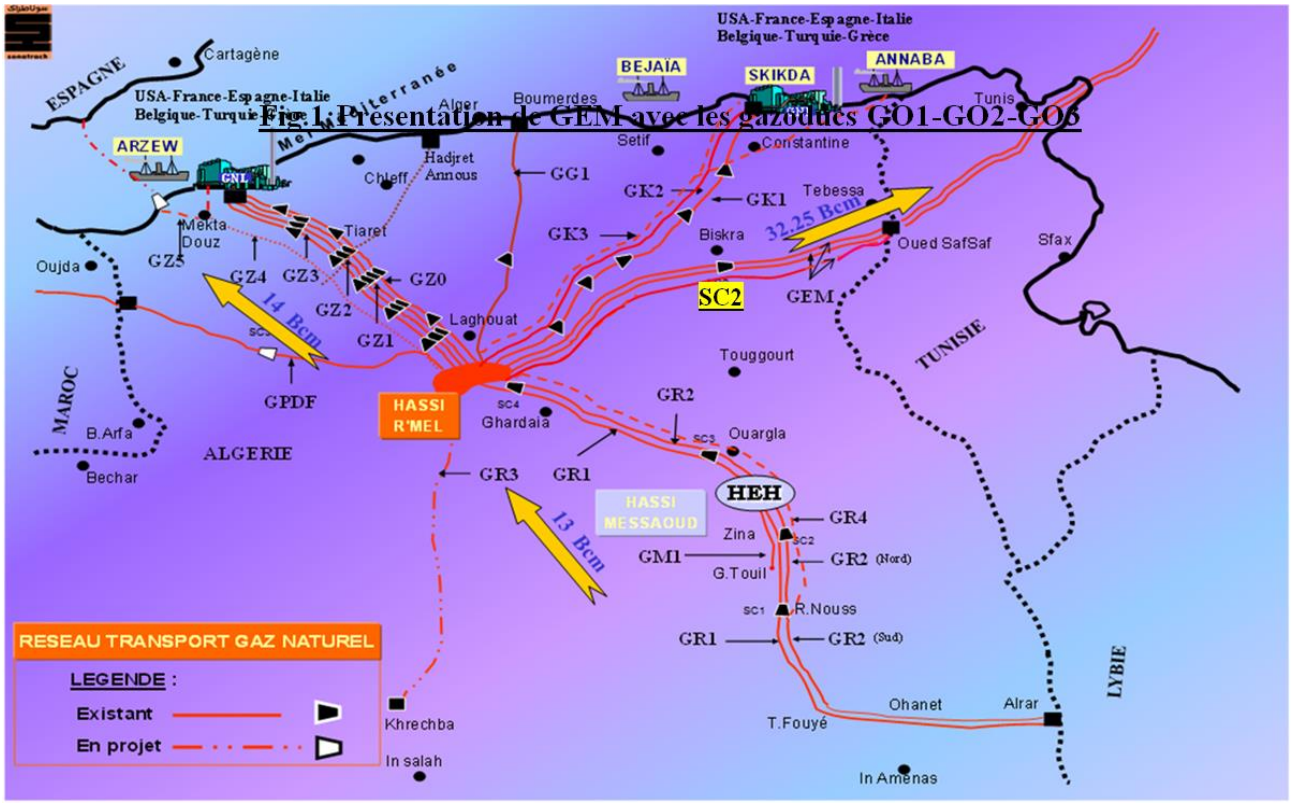


Figure 1.1 Carte descriptive du passage des gazoducs GO1/GO2 et GO3



Figure I.2 Carte descriptive du passage des gazoducs vers le client

I.2.1. Capacité de Transport

Les phases de transport par GO1 / GO2/GO3, pour les conditions suivantes :

70 bar à Hassi R'mel et 51 bar à OUED Saf-Saf :

OUVRAGE	MISE EN SERVICE	CAPACITÉ EXPORTEE
GO1	Mai 1983	8,84 Milliards CM³/AN
GO2	Juin 1987	8,84 Milliards CM³/AN
GO1 ET GO2 EN SERVICE	Juin 1987	17,68 Milliards CM³/AN
GO1 + GO2 ET SC2 EN SERVICE	Août 1995	24,25 Milliards CM³/AN
GO.3	Décembre 2009	8,84 Milliards CM³/AN
GO1 + GO2 + GO.3	Décembre 2009	26,52 Milliards CM³/AN
GO1 + GO2 + GO3 + SC2	2010	32 Milliards CM³/AN

Tableau I.1 Capacité du gaz transporte des gazoducs GO1, GO2 et GO3

I.2.2. Commercialisation

La livraison se fait au moyen d'un système de comptage électronique de grande précision composé de rampes de mesure pour couvrir toutes les gammes de débits prévues durant les différentes phases de transport, et d'un système d'analyse contrôlant la qualité du gaz avec toutes ses spécifications.

Elle se fait également conformément aux obligations contractuelles avec les clients notamment internationaux ou locaux.

I.3. Creation de la direction des gazoducs gem

La Direction des Gazoducs GO1/GO2 est créée le 3/12/1996 et baptisé par décret présidentiel du 14/ 11/ 1999 au nom de **Enrico Mattei ;** né en 1906 et décédé en 1962, homme politique italien et fondateur, président de l'entreprise ENI.

Il a activement soutenu le peuple algérien pendant sa lutte et son indépendance, tout en encourageant le partenariat **Algéro-Italie** dans le domaine des hydrocarbures.

La direction des gazoducs GO1/GO2 est l'un des plus importants ouvrages de l'Algérie connu avant d'être baptisé Enrico Mattei, sous le nom de « TRANSMED ».

Dans sa stratégie affichée de demeurer un fournisseur « sûr et régulier » de l'Europe et pour atteindre cet objectif, TRC a lancé un projet d'extension de ses capacités qu'est traduit par la réalisation d'un looping "PC1/PC3".

Le looping "PC1/PC3" de longueur de 293 km et diamètre de 48", avec ses ouvrages annexes, traverse les willayas de Djelfa, Msila, Biskra, Khenchela et Touggourt et fera partie intégrante des ouvrages du GEM. [1]

Cette looping permet actuellement l'augmentation de la capacité de transport du gaz de trois (3) milliards CM^3/An vers Oued Saf-Saf. Il relie le poste de coupure PC1 situé au point PK 168 km, au poste de coupure PC3 situé au point PK 492 km en passant par la station de compression de Ain Naga au PC2 située au PK 349 km. [1]

Le looping "PC1/PC3" est enterré et posé dans le même couloir et parallèlement aux gazoducs GEM GO1/GO2.Il est raccordé à ces derniers au niveau des trois postes de coupures PC1, PC2, PC3.

I.4. Description des ouvrages de l'entreprise

Le gazoduc Hassi R'mel- Oued Saf-Saf (GO1/GO2/GO3) est constitué par trois lignes de diamètre 48" pour chacun en acier API SLX-X70 de la langueur de 549 Km.[1]

Les ouvrages concentrés suivants constituent partie intégrante du gazoduc.

- Terminal départ de HASSI R'mel
- Trois postes de coupure (deux postes et une station de compression SC2).
- 13 (treize) postes se sectionnement de la ligne GO1, 14 postes GO2 et 18 postes GO3.

- 7 (sept) postes de purge.
- 15 (quinze) postes de protection cathodique.
- Terminal arrivé d'Oued Saf-Saf.

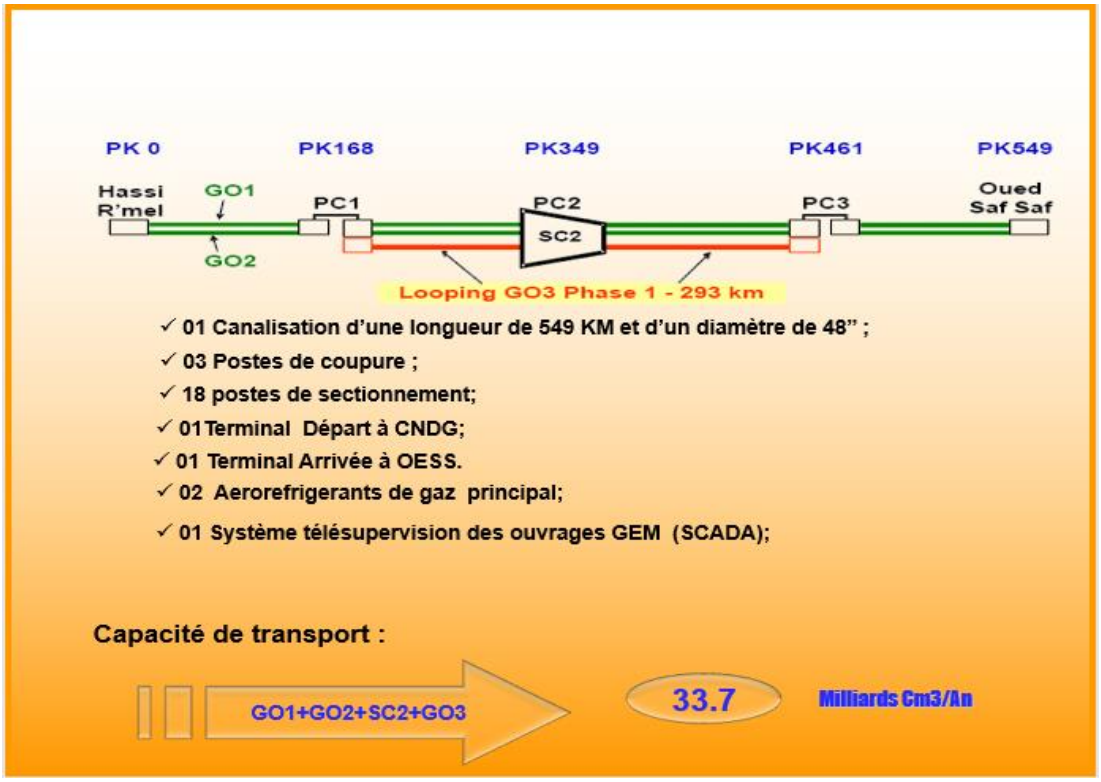


Figure I.3 Gazoducs Hassi r'mel - Oued el Saf-Saf

I.4.1. Terminal départ de HASSI R'MEL

Il se compose essentiellement pour chaque gazoduc d'un : banc de comptage, banc de régulation de pression, un système de vanne de sécurité et une gare de lancement des racleurs

1.4.2. Postes de coupure

Les postes de coupure le long de gazoduc sont trois. Chaque postes de coupure projeté pour l'installation future d'une station de compression, se compose essentiellement d'une gare de réception des racleurs, d'un groupe de filtrage de gaz et d'une gare de lancement des racleurs d'un système de gaz combustible domestique, il faut notes en plus que seulement le PC2 (SC2) possède 2 soupapes de sécurité (PSV) (1 en fonction de 1 de réserve).

I.4.3. La station de compression SC2

Elle se trouve dans la commune de Ain Naga Daïra de Sidi Okba, située à 50 km au sud-est de Biskra et à une altitude de (-3) m.

La station est réalisée pour répondre à la demande croissante des clients de Sonatrach en gaz naturel et assurer ainsi la livraison du volume contractuel de 27.25 Milliards CM3/An avec la nouvelle looping.[1]

Elle est installée sur le réseau des gazoducs et a pour rôle le renforcement de leur capacité de transport pendant les périodes de pointes selon un programme prévisionnel d'approvisionnement prévu pour l'enlèvement régulier.

La station de compression SC2 est dimensionnée de manière à ce qu'elle puisse répondre à une certaine demande tout en respectant les conditions et restrictions qui s'imposent, à savoir la pression disponible au terminal départ (Hassi R'mel) et la pression minimale contractuelle de livraison à garantir au terminal arrivé Oued Saf-Saf.

Elle comprend trois assiettes pour les gazoducs GO1/GO2/GO3, dans chacune il y a de deux gares racleur arrivée et départ, les assiettes GO1/GO2/GO3 contiennent trois batteries à quatre (04) filtres séparateurs, chaque filtre est de type à cyclone. Le gaz combiné dans le collecteur d'aspiration 56" est comprimé à travers les quatre (04) turbocompresseurs TC21, TC22, TC23 et TC24 puis refroidi à travers les cinq (05) aéro- réfrigérants EA21, EA22, EA23,EA24, EA25 avant d'être envoyé dans les trois gazoducs.

Le contrôle de la station est automatique local avec report d'information au dispatching de Oued Saf-Saf.

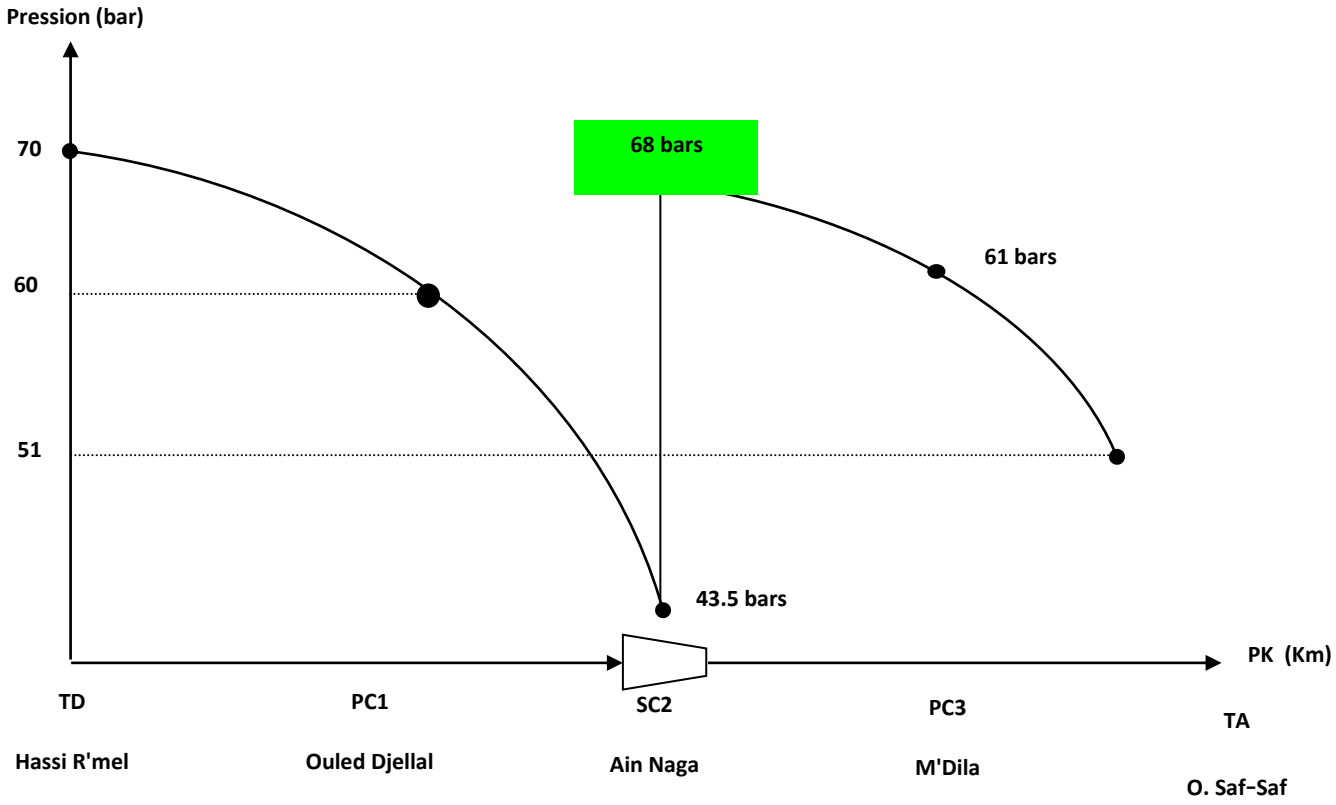


Figure I.4 Ecoulement renforcée par la station SC2 d'AIN NAGA

I.4.4. Vannes de ligne

Les postes de sectionnement le long du gazoduc sont aux nombres de (13) G01et (14) G02 et (18) GO3. Chaque poste de sectionnement se compose essentiellement d'une vanne à sphère 48" à passage intégral, d'un by-pass et d'un dispositif de décharge à l'atmosphère.

La vanne est pourvue d'un système de fonctionnement de type pneumo hydraulique doté d'un dispositif "line break" pour la fermeture automatique de la vanne en cas rupture de la ligne.

Le système de fonctionnement est équipé en outre d'un dispositif avec temporisateur qui après l'intervention du dispositif "line break" réouvre la vanne quand la pression de la ligne est supérieure à 40 bars.

I.4.5. Postes de purge

Les postes de purge le long du gazoduc sont aux nombres (7) et sont situés en amont et en aval de chacun des trois postes de coupure et en amont de terminal arrivée d'Oued Saf-Saf

I.4.6. Postes de protection cathodique

La protection cathodique s'obtient, en circulant un courant continu entre la conduite à protéger fonctionnant comme cathode et les anodes (déversoir anodique). Ce courant circule de l'anode a la cathode par l'intermédiaire d'un électrolyte (sol) ainsi on obtient un abaissement du potentiel du métal jusqu'à ce que celui-ci soit dans la zone d'immunité par rapport à une électrode de référence en $Cu/CuS0_4$.

I.4.7. Le Terminal arrivée d'OUED El SAF-SAF « site d'étude »

Le terminal arrivée est composé, pour la gestion du gazoduc (GO1/ GO2/GO3), d'un banc de filtrage, d'un banc de régulation du pression, d'un banc de comptage, d'une salle de contrôle et des bâtiments administratifs et de service.

Le terminal d'arrivée de OUED ES SAF-SAF reçoit le gaz venant du terminal départ de Hassi R'mel par les trois gazoducs (GO1 / GO2/GO3), pourvoit à la régulation de pression et au comptage et ensuite il délivre le gaz vers l'Italie via la Tunisie.

Le site d'exploitation au niveau du terminal arrivé se comporte :

Un système de sécurité composé de **02 soupapes** et un **évent** pour chaque gazoduc qui ont pour but de protéger le terminal d'arrivé de la haute pression.

- Un **gare racleur** d'arrivé pour chaque Gazoduc GO1/GO2/GO3
- Un **banc de filtration** constitué de trois filtres **horizontaux** pour chaque gazoduc. Les filtres à pour but de séparer les impuretés de gaz cumulé au cours de transport comme le condensat, l'eau.
- Un **banc de régulation** de pression se compose de cinq rampes de régulation et d'un by-pass, et un système de sécurité se compose d'un groupe de 3 soupapes sont ouvrir due que la pression atteinte 62 bar qui ont pour but de protéger **les rampes de comptage** de la haute pression (pour chaque gazoduc).
- Un **banc de comptage** de cinq rampes de comptage calorifugées.

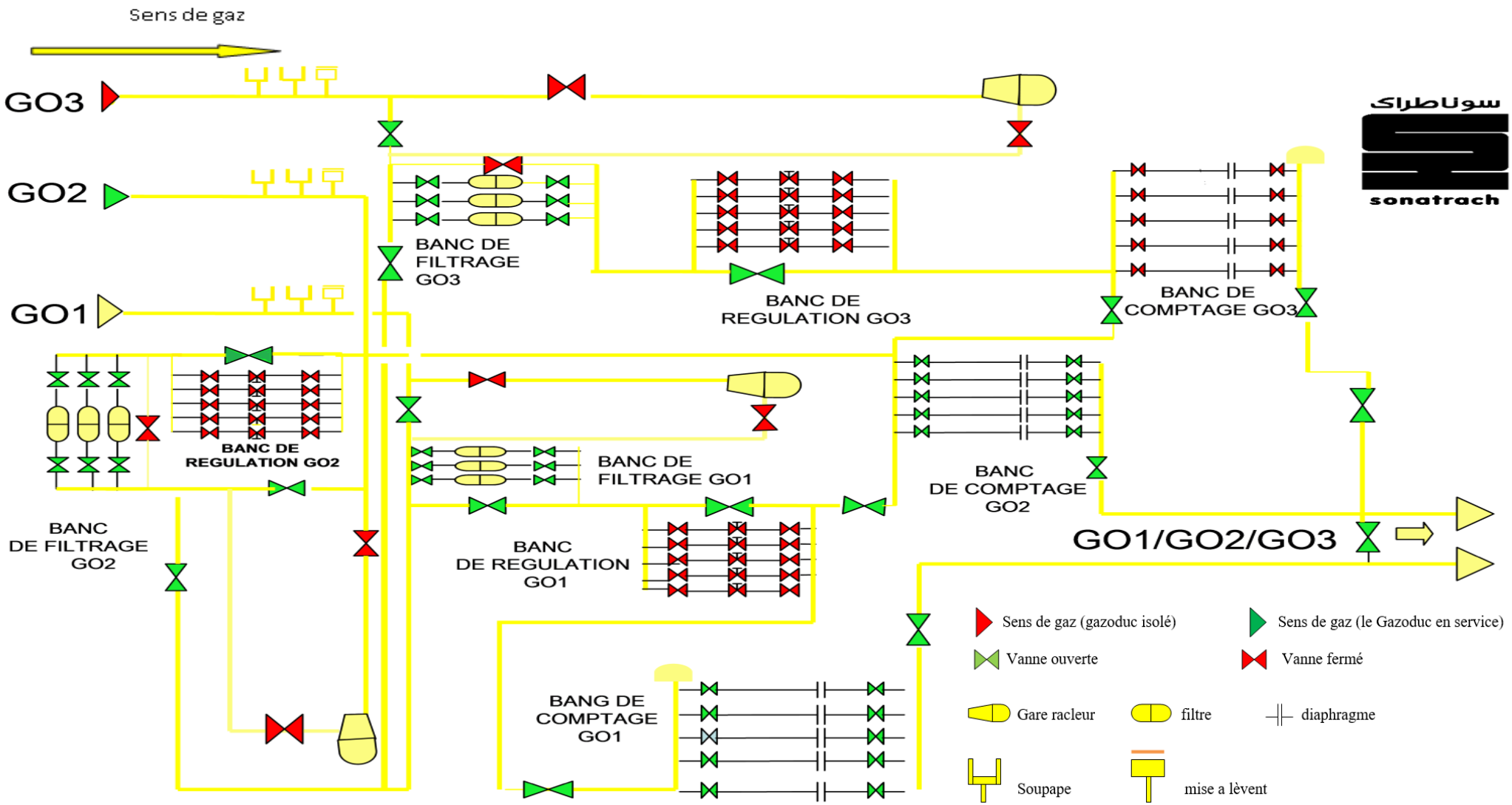


Figure I.5 Terminal arrivée GEM

I.5. Conclusion

Les gazoducs Enrico Mattei jouent un rôle important dans l'économie Algérien dans le cadre d'exportation des hydrocarbures en général et du gaz précisément, pour réaliser ce rôle il faut tous les infrastructures de la direction GEM assurer ces taches affectées puis intégrer toutes les améliorations en matière de sécurité des ouvrages et de respect de l'environnement ainsi l'exploitation idéale technique et économique des gazoducs.

Chapitre II

Présentation générale des systèmes de pression

II.1. Introduction

La pression est une grandeur physique fondamentale qui exprime la force exercée sur une surface donnée. Elle est omniprésente dans notre vie quotidienne, qu'il s'agisse de l'air que nous respirons, de la circulation sanguine dans notre corps ou du fonctionnement des machines. En physique, elle se mesure généralement en pascals (Pa), et joue un rôle crucial dans de nombreux phénomènes naturels et applications techniques.

Dans le domaine industriel, la maîtrise de la pression est essentielle pour garantir le bon fonctionnement des installations, la sécurité des opérateurs, ainsi que l'efficacité des procédés. Qu'il s'agisse de gaz sous pression, de vapeur, de fluides hydrauliques ou de systèmes pneumatiques, de nombreux secteurs – comme la chimie, l'énergie, la pétrochimie, l'aéronautique ou encore l'agroalimentaire – dépendent d'un contrôle précis de la pression. Une mauvaise gestion de celle-ci peut entraîner des dysfonctionnements, des pertes économiques, voire des accidents majeurs. Ainsi, comprendre et surveiller la pression constitue un enjeu stratégique pour l'industrie moderne.

II.2. Définition et notion fondamentales sur la pression

La pression est une grandeur physique qui désigne la force exercée par un fluide (gaz ou liquide) sur une surface donnée. Elle est définie comme le rapport de la force appliquée à la surface sur laquelle elle s'exerce :

$$\text{Pression} = \text{force} / \text{surface}$$

Où :

- P est la pression (en pascal, Pa),
- F est la force (en newton, N),
- S est la surface (en mètre carré, m^2).

Dans le domaine industriel, et plus particulièrement dans le transport et la distribution de gaz, la pression est une variable clé qui détermine la capacité d'acheminer le gaz sur de longues distances et d'assurer son bon fonctionnement dans les équipements en aval.

Les unités couramment utilisées :

- Pascal (Pa) : unité du Système International (SI).
- Bar : souvent utilisé dans l'industrie (1 bar = 100 000 Pa).
- Psi (pound per square inch) : courant dans les pays anglo-saxons (1 psi ≈ 6895 Pa).

Types de pression :

- Pression absolue (Pabs) : Mesurée par rapport au vide absolu.
- Pression relative (Prel) : Mesurée par rapport à la pression atmosphérique.
- Pression atmosphérique (Patm) : Pression exercée par l'air sur la surface terrestre (environ 1 bar au niveau de la mer).
- Pression différentielle : Différence entre deux pressions mesurées.

II.2.1. Notion spécifique au gaz

Dans le cas des gaz, la pression est étroitement liée à la température et au volume selon l'équation d'état des gaz parfaits : **PV= nRT**

Où :

- P : pression,
- V : volume,
- n : quantité de gaz (en mol),
- R : constante des gaz parfaits,
- T : température absolue (en Kelvin).

II.2.2. Le rôle de la pression dans les systèmes de gaz

- Assurer le transport efficace du gaz dans les conduites.
- Maintenir le débit approprié vers les utilisateurs.
- Prévenir les risques de fuite ou d'explosion.
- Garantir la stabilité des équipements de production et de distribution.

Ainsi, la compréhension des notions fondamentales sur la pression est essentielle pour maîtriser la gestion des installations industrielles utilisant le gaz, notamment dans les réseaux de transport et de distribution.

II.3. Importance de la pression de gaz dans l'industrie

Le gaz occupe une place essentielle dans l'industrie, que ce soit comme fluide énergétique ou comme matière première dans de nombreux procédés. Son transport sur de longues distances, tout comme son utilisation en production, exige une gestion rigoureuse de la pression. Une pression mal maîtrisée peut provoquer des pertes économiques, des pannes d'équipements, voire des accidents graves mettant en danger les personnes et les installations.

Dans différents secteurs industriels, la pression des gaz est exploitée à diverses fins par exemple : dans l'énergie, elle permet d'alimenter turbines et systèmes de combustion.

Une maîtrise efficace de la pression permet non seulement d'assurer la sécurité des procédés, mais aussi d'en améliorer les performances, de réduire les pertes.

II.3.1. Composants d'un système de pression de gaz

Un système de pression de gaz est composé de plusieurs éléments techniques qui assurent la sécurité, la régulation et la distribution du gaz sous pression. Les principaux composants sont :

- **Réservoirs ou bouteilles de stockage** : contiennent le gaz sous haute pression.
- **Compresseurs** : augmentent la pression du gaz pour le stockage ou le transport.
- **Régulateurs de pression** : ajustent la pression à un niveau précis selon les besoins du processus.
- **Vannes de contrôle** : ouvrent ou ferment le passage du gaz pour diriger le flux.
- **Manomètres et capteurs** : mesurent et surveillent la pression en temps réel.
- **Tuyauterie** : transportent le gaz dans le réseau industriel.
- **Soupapes de sécurité** : protègent le système contre les surpressions accidentelles.

II.4. Importance du contrôle de la pression en milieu industriel

En milieu industriel, la gestion précise de la pression du gaz est une exigence fondamentale pour garantir le bon fonctionnement des installations et assurer la sécurité des équipements et des personnes. Une pression inadéquate, qu'elle soit trop élevée ou trop basse, peut entraîner des conséquences graves sur le plan technique, économique et sécuritaire.

Tout d'abord, une pression excessive peut provoquer des surcharges sur les équipements, entraînant des fuites, des ruptures de canalisations, voire des explosions, mettant en péril la sécurité des travailleurs et causant des arrêts de production prolongés. À l'inverse, une pression insuffisante peut altérer le fonctionnement des machines, réduire l'efficacité des procédés industriels et entraîner des pertes économiques importantes.

Dans les industries utilisant le gaz comme fluide énergétique ou matière première, telles que l'industrie pétrochimique, les centrales électriques ou les installations de transport de gaz, le contrôle rigoureux de la pression est indispensable pour assurer la continuité des opérations et optimiser la consommation énergétique. Une régulation instable ou défectueuse de la pression

peut également nuire à la qualité des produits finis et engendrer des coûts supplémentaires liés à la maintenance et aux réparations.

Enfin, le respect des normes de sécurité et des réglementations en vigueur dans le secteur industriel impose aux entreprises de surveiller en permanence la pression des gaz pour éviter tout incident susceptible d'affecter l'environnement ou la santé publique.

Ainsi, le contrôle efficace de la pression est un levier essentiel pour assurer la fiabilité, la rentabilité et la sécurité des installations industrielles.

II.4.1. Risques liés à l'instabilité de la pression

L'instabilité de la pression dans un système de gaz peut entraîner de sérieuses conséquences techniques et humaines. Des fluctuations non maîtrisées peuvent générer des vibrations anormales, des fuites, voire des explosions, compromettant à la fois la sécurité du personnel et la continuité des opérations industrielles. D'où l'importance d'une régulation précise et constante.

Parmi les principaux risques liés à une mauvaise gestion de la pression, on peut citer :

- Des explosions ou des fuites causées par une surpression incontrôlée.
- Des interruptions de production dues à des écarts de pression imprévus.
- Une usure prématurée des équipements, liée à des cycles de pression instables.
- Des risques sanitaires pour les opérateurs, en cas d'exposition à des gaz inflammables ou toxiques.

Face à ces dangers, il est impératif que la conception, la maintenance et le pilotage des systèmes de pression respectent des normes de sécurité strictes. Cela garantit non seulement la fiabilité des installations, mais aussi la protection des personnes et de l'environnement.

II.4.2. Nécessité du contrôle de la pression

Le contrôle rigoureux de la pression est essentiel pour assurer le bon fonctionnement des procédés industriels. Une pression mal ajustée peut avoir des conséquences graves : une pression trop faible risque de compromettre les performances des équipements, tandis qu'une

pression excessive peut entraîner des dégâts matériels, des accidents, voire des interruptions de production.

Une régulation efficace permet de maintenir la pression dans une plage optimale, adaptée aux exigences de chaque application. Ceci est rendu possible grâce à des dispositifs de surveillance automatisée et de régulation de haute précision.

Un bon contrôle de la pression garantit :

- La sécurité des installations et la protection du personnel.
- La continuité des opérations et une efficacité optimale des procédés.
- La réduction des pertes économiques liées aux arrêts imprévus, aux pannes ou àla détérioration des équipements.
- Une meilleure efficacité énergétique et une durée de vie prolongée des systèmes.

Ainsi, la gestion précise de la pression constitue un levier stratégique pour allier performance industrielle et sécurité opérationnelle.

II.5. Composants d'un système de pression

Un système de pression est constitué de plusieurs éléments essentiels qui assurent la mesure, le contrôle et la régulation de la pression dans un circuit de gaz industriel. Voici les principaux composants :

II.5.1. Capteurs de pression

Les capteurs de pression sont des dispositifs utilisés pour mesurer la pression dans un système de gaz. Ils convertissent la pression physique en un signal électrique exploitable par le système de contrôle. Il existe plusieurs types de capteurs :

- Capteurs piézorésistifs
- Capteurs capacitifs
- Capteurs à jauge de contrainte

Ces capteurs permettent de surveiller en temps réel les variations de pression et d'assurer la sécurité et la stabilité du système.

II.5.2. Soupapes et vannes

Les soupapes et les vannes jouent un rôle crucial dans la régulation du débit et de la pression du gaz. Elles permettent d'ouvrir, de fermer ou de moduler le passage du fluide selon les besoins du processus industriel.

Parmi les plus courantes :

- Soupapes de sécurité : libèrent le gaz en cas de surpression.

- Vannes de régulation : ajustent le débit pour maintenir une pression constante.

- Vannes d'arrêt : interrompent totalement le flux en cas d'urgence.

II.5.3. Régulateurs et actionneurs

Les régulateurs sont des dispositifs qui assurent le maintien de la pression à une valeur prédéterminée. Ils agissent sur les vannes en fonction des informations transmises par les capteurs. Les actionneurs, quant à eux, sont les organes d'exécution qui modifient physiquement la position des vannes selon les ordres reçus du système de commande. Ils peuvent être :

- Pneumatiques
- Hydrauliques
- Électriques

II.5.4. Tuyauteries

Les tuyauteries constituent le réseau de transport du gaz sous pression. Elles doivent être adaptées aux contraintes de pression et aux caractéristiques du gaz transporté. Le choix des matériaux (acier, cuivre, polymères) est déterminé en fonction des conditions de service (pression, température, corrosion).

II.6. Conclusion

La pression des gaz joue un rôle crucial dans de nombreux secteurs industriels. Sa maîtrise est indispensable pour assurer la sécurité des installations, la performance des procédés et la prévention des risques**.** Un système de pression efficace repose sur des composants adaptés et un contrôle rigoureux pour éviter les incidents liés à une instabilité.

En respectant les normes de sécurité et en assurant une régulation précise, les industries peuvent garantir la continuité de production, réduire les pertes et prolonger la durée de vie des équipements. La gestion de la pression est donc un levier stratégique pour toute activité industrielle.

Chapitre III

La Régulation Automatique

III.1. Introduction

Le terme de régulation est employé lorsqu'on cherche à combattre des perturbations afin de garder une valeur constante par exemple, une température, une pression, un débit ou une hygrométrie...

La régulation mesure en permanence par les capteurs, le système à régler puis transmet ces informations au régulateur celui-ci compare cette mesure à la valeur désirée (la consigne) puis suivant son algorithme le régulateur va transmettre ses ordres aux actionneurs (vannes, volets, moteurs, etc.), afin de corriger les erreurs et conduire la sortie du système vers la consigne.

Le système souvent cite comme étant la première réalisation d'un correcteur automatique est la clepsydre de *Ktesibios* (−270 av. J.C) (Figure III.1). Afin d'améliorer le principe de l'horloge à eau, *Ktesibios* introduit un réservoir supplémentaire dans le quel volume de liquide reste constant grâce à un mécanisme qui ferme l'entrée du réservoir lorsque celui-ciest trop plein.

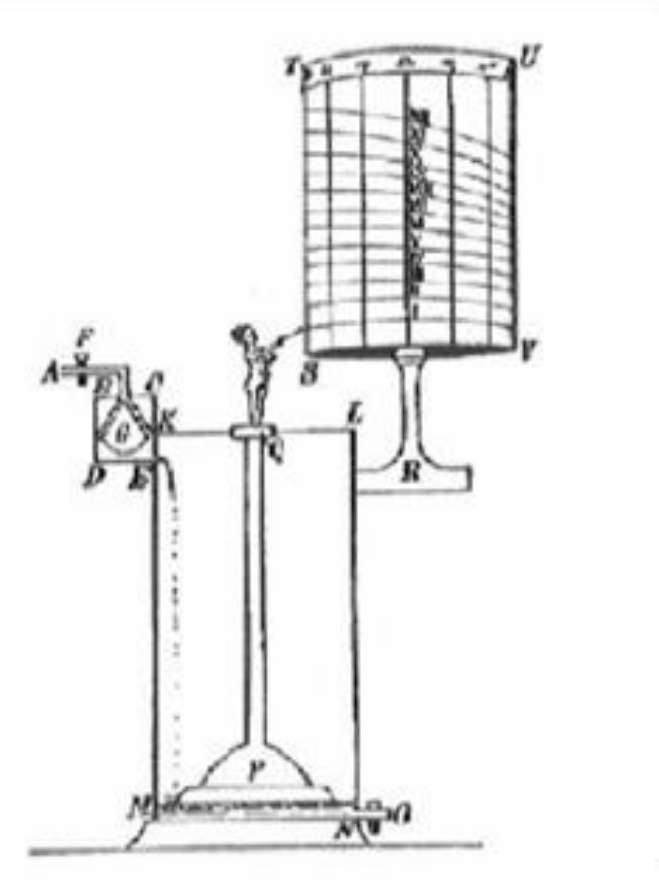


Figure III.1 Clepsydre de *ktesibios* (-270 av. j.c, alexandrie)

Les développements de l'horloge conduisent alors à la création d'automates extrêmement compliqués. Citons, à titre d'exemple, le canard de Vaucanson (1709-1782) qui pouvait boire, se nourrir, caqueter, nager, "digérer" et déféquer. L'idée de la programmation est née à peu près à la même époque. En 1728, Jean-Philippe Falcon crée le premier métier à tisser programmable par cartons perforés. Vaucanson réalise un métier à tisser programme en 1745, et en 1801 le célèbre métier à tisser automatique programmable de Joseph-Marie Jacquard.

A la même époque d'autres systèmes voient le jour, poussés par la révolution industrielle qui est en marche. Denis Papin développé la soupape de sécurité pour les systèmes fonctionnant à la vapeur et James Watt invente le régulateur de vitesse à boule.

Les réalisations précédentes ne manquent pas d'ingéniosité, néanmoins il faudra attendre l'arrivée de l'électricité puis de l'électronique pour voir apparaitre les premiers correcteurs entant que tels. Enfin, le développement des microprocesseurs puis celui des microcontrôleurs permet aujourd'hui de mettre en œuvre des principes de commande très élabores. [5]

En industrie, les régulateurs PID répondent à plus de 90% de ces besoins. Par exemple, le nombre de régulateurs installés dans une usine industrielle se compte par milliers. Dans ce chapitre nous allons présenter quelques notions sur la régulation automatique puis nous présenterons des généralités sur le régulateur PID, ses différentes structures, ainsi que ses domaines d'applications, et enfin les avantages et les inconvénients de son utilisation.

III.2. Objectif de régulation automatique

Réguler une grandeur, c'est obtenir d'elle un comportement donné, dans un environnement susceptible de présenter des variations. On ne peut pas parler de principe de régulation sans parler des lois de commandes. En faite, les grandeurs physiques commandées varient continûment dans le temps. Pour celles qui ne présentent que 2 états (système binaire ou « tout ou rien », tels les feux de signalisation, les commandes d'ascenseurs, de transfert de pièces par convoyeurs, etc..) en utilisent une autre approche différente à la structure de boucle utilisé dans la plupart des systèmes y compris notre système.

Les systèmes automatiques assurent en fait 2 types de fonctions :

- Maintenir la grandeur commandée, ou grandeur réglée, à une valeur de référence malgré les variations des conditions extérieurs ; on parle de la régulation en sens strict,

- Répondre à des changements d'objectif, ou à un objectif variable tel-que la poursuite de cible, on parle d'un fonctionnement d'asservissement.

III.3. Principe de la régulation

Dans la plupart des appareils et installations industrielles, tertiaires et mêmes domestiques, il est nécessaire de maintenir des grandeurs physiques à des valeurs déterminées, en dépit des variations externes ou internes influant sur ces grandeurs. Le niveau d'un réservoir d'eau, la température d'une étuve, le débit d'une conduite de gaz, étant par nature variables, doivent donc être réglés par des actions convenables sur le processus considéré. Si les perturbations influant sur la grandeur à contrôler sont lentes ou négligeables, un simple réglage (dit en boucle ouverte) permet d'obtenir et de maintenir la valeur demandée (par exemple : action sur un robinet d'eau).

Dans la majorité des cas, cependant, ce type de réglage n'est pas suffisant, parce que trop grossier ou instable. Il faut alors comparer, en permanence, la valeur mesurée de la grandeur réglée à celle que l'on souhaite obtenir et agir en conséquence sur la grandeur d'action, dite grandeur réglante. On a, dans ce cas, constitué une boucle de régulation et plus généralement une boucle d'asservissement.

Cette boucle nécessite la mise en œuvre d'un ensemble de moyens de mesure, de traitement de signal ou de calcul, d'amplification et de commande d'actionneur. Constituant une chaine d'éléments associes : la chaine de régulation (ou d'asservissement).

Toute chaine de régulation (ou d'asservissement) comprend trois maillons indispensables : l'organe de mesure, l'organe de régulation et l'organe de contrôle. Il faut donc commencer par mesurer les principales grandeurs servant à contrôler le processus. L'organe de régulation récupère ces mesures et les compare aux valeurs souhaitées, plus communément appelées valeurs de consigne. En cas de non concordance des valeurs de mesure et des valeurs de consigne, l'organe de régulation envoie un signal de commande a l'organe de contrôle (vanne, moteur, etc.), afin que celui-ci agisse sur le processus. Les paramètres qui régissent le processus sont ainsi stabilises en permanence à des niveaux souhaites

III.3.1. Notions de base

Un système est un ensemble de processus, physique et chimique, en évolution. Des actions sur le système (entrées) sont effectuées dans le but d'obtenir des réponses souhaitées (sorties). Les signaux qui véhiculent dans un système sont de deux types :

- ✓ **Signaux d'entrées :** Ils sont indépendants du système et peuvent être commandés (consignes) ou non commandés (perturbations). µ
- ✓ **Signaux de sorties :** Ils sont dépendants du système et du signal d'entrée. Pour évaluer les objectifs, ces signaux doivent être observables moyennant des capteurs.

La Figure (III.1) illustre un système à une entrée de commande, une sortie et une entrée de perturbation. [3]

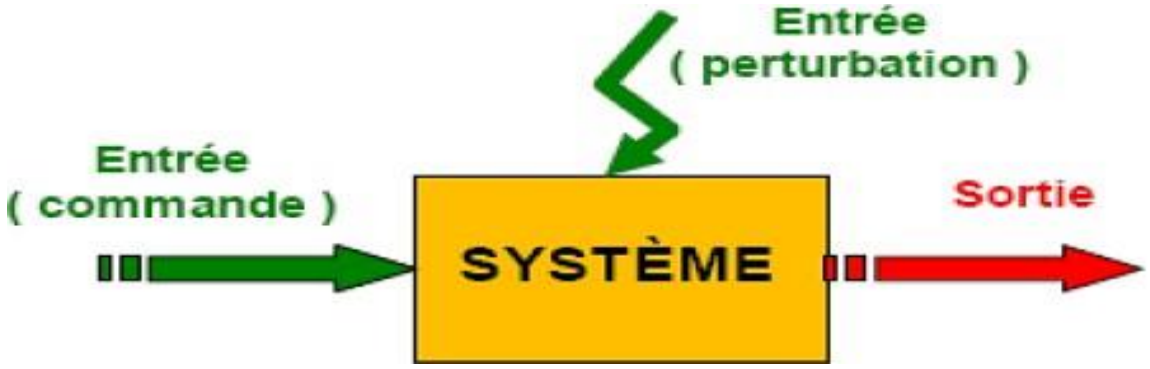


Figure III.2 Différents signaux relatifs a un système.

III.3.2. Modèle mathématique [4]

Pour pouvoir utiliser les schémas précédents, il faut pouvoir décrire efficacement chaque processus physique situé à l'intérieur des blocs rectangulaires. Pour pouvoir analyser le comportement de ces processus, il est intéressant de pouvoir disposer d'un modèle mathématique de ces processus.

La phase de la modélisation est essentielle dans le processus de mise au point de régulateurs. Toutefois le but de ce projet n'est pas d'étudier en détail la modélisation des systèmes dynamiques. On se contentera de savoir modéliser rapidement et simplement.

Définition : on définit le modèle mathématique d'un système dynamique comme un ensemble d'équations qui représente le comportement dynamique du système avec la précision souhaitée. Il est obtenu en écrivant les lois de la physique qui régissent le comportement du système.

Obtention du modèle de comportement :

- Définir le système étudié et ses composants élémentaires.
- Formuler le modèle mathématique idéal (modèle de connaissance) et dresser la liste des hypothèses à retenir.
- Ecrire les lois de la physique (équations différentielle).
- Définir le modèle dédié à la régulation (fonction de transfert).

III.3.2.1. Fonction de Transfert

Pour un système, la fonction de transfert est l'expression mathématique plus au moins complexe qui indique le rapport entre une fonction du signal de sortie et une fonction du signal d'entrée.

Définition : La fonction de transfert d'système continu est le rapport de la transformée de Laplace de sa sortie sur la transformée de Laplace de son entrée en considérant les conditions initiales nulles. **F(p)= Sortie(p) /Entrée(p).**

L'ordre du système est le degré le plus élevé du polynôme du dénominateur appelé polynôme caractéristique.

- **Systèmede1^{er}ordre**

Par définition, ces systèmes obéissent à une équation différentielle du premier ordre à coefficients constants :$$\mathbf{X(t)} = \boldsymbol{a} + \frac{\boldsymbol{dy(t)}}{\boldsymbol{dt}} + \boldsymbol{by(t)} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \quad (\text{III. } 1)$$

Où ***x*(*t*) et *y*(*t*)** représentent respectivement l'entrée et la sortie du système.

La transformée de Laplace de l'équation, où les conditions initiales sont considérées nulles, Permet d'obtenir facilement la forme générale de la fonction de transfert des systèmes du premier Ordre $$\mathbf{F(p)} = \frac{\boldsymbol{y(p)}}{\boldsymbol{x(p)}} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{ap+b}} = \frac{\mathbf{1}/\boldsymbol{b}}{\mathbf{1}+\left(\frac{\boldsymbol{a}}{\boldsymbol{b}}\right)\boldsymbol{p}} \dots\dots\dots\dots\dots\dots \quad (\text{III. } 2)$$

En utilisant les changements de variables *K*=1=*b* et *T*=*a*/*b* on obtient la forme (appelée forme Standard) d'une fonction de transfert d'un système du premier ordre :

$$\boldsymbol{F(p)} = \frac{\boldsymbol{K}}{\mathbf{1} + \boldsymbol{\tau p}} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots \quad (\text{III. } 3)$$

F(*p*) possède 2 paramètres essentiels : *K* et τ

- **Le gain statique** du système *K* s'exprime dans la même unité que le rapport $\frac{\Delta(\boldsymbol{y})\boldsymbol{t}}{\Delta(\boldsymbol{x})\boldsymbol{t}}$

Pour un système stable (la sortie est constante en régime permanent), le gain statique représente la valeur prise par sa réponse à une entrée en échelon unitaire quand $t \rightarrow \infty$

La constante de temps $\boldsymbol{\tau}$ du système s'exprime en seconde set caractérise la vitesse (dynamique) de réaction d'un système. Ces deux grandeurs suffisent à caractériser tout système du premier ordre: ce sont ses grandeurs (Paramètres) caractéristiques.

- **Réponses temporelles** Il est intéressant de connaître et de reconnaître les réponses des systèmes du premier ordre aux signaux temporels classiques : impulsion, échelon, rampe. Cela permettra en particulier une comparaison avec les signaux réponses du système physique sur lequel on travaille.

- **Réponse impulsionnelle**

La réponse impulsionnelle d'un système est la sortie de ce système suite à une sollicitation en impulsion de Dirac :

$$X(t) = \left(\begin{array}{c} \infty \; pour \; t = 0 \\ 0 \; pour \; t \neq 0 \end{array} \right) \Longrightarrow X(p) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(III.4)}$$

Les équations (3) et (4) permettent d'écrire l'expression de la réponse impulsionnelle :

$$\mathbf{y(p)} = \frac{\boldsymbol{K}}{\boldsymbol{1+\tau P}}\boldsymbol{x(p)} = \frac{\boldsymbol{k}}{\boldsymbol{\tau}}\frac{\boldsymbol{1}}{\boldsymbol{P+(\frac{1}{\tau})}} \rightarrow \boldsymbol{y(t)} = (\frac{\boldsymbol{k}}{\boldsymbol{\tau}})\boldsymbol{e}^{(-\boldsymbol{t}/\boldsymbol{\tau})} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \text{(III.5)}$$

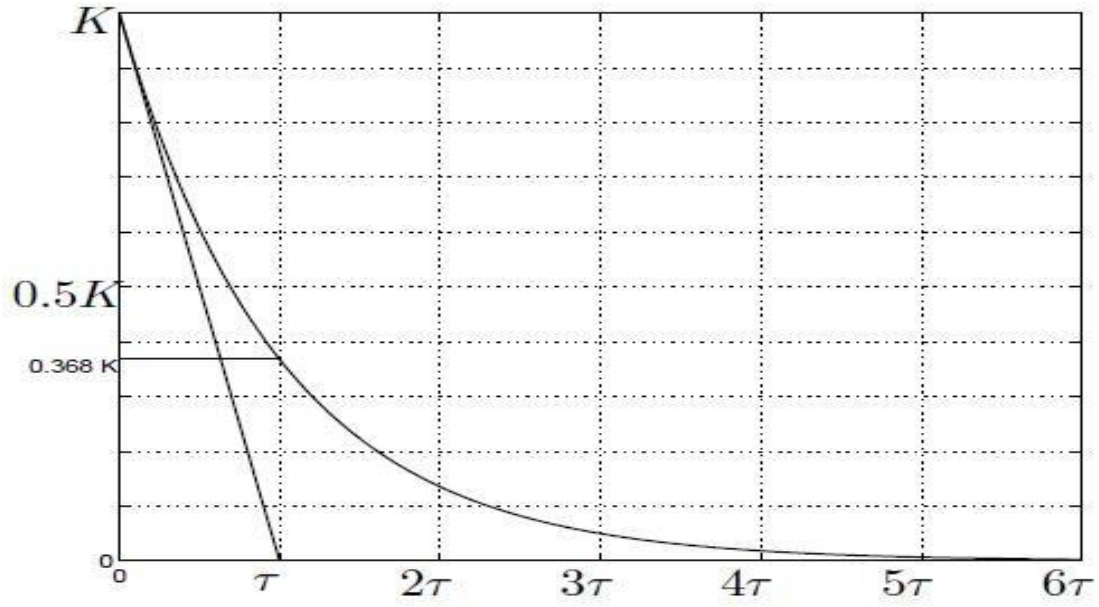


Figure III.3Réponse impulsionnelle d'un système du 1er ordre

- **Système 2ème ordre**

Par définition, ces systèmes obéissent à une équation différentielle du deuxième ordre coefficients constants :

$$\mathbf{X(t)} = \boldsymbol{a} + \frac{\boldsymbol{d^2y(t)}}{\boldsymbol{dt^2}} + \boldsymbol{b}\frac{\boldsymbol{dy(t)}}{\boldsymbol{dt}} + \boldsymbol{cy(t)} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad (III.6)$$

Où *x*(*t*) et *y*(*t*) représenté entres respectivement l'entrée et la sortie du système. La transformée de La place de l'équation1.7, où les conditions initiales sont considérées nulles, permet d'obtenir facilement la forme générale de la fonction de transfert des systèmes du premier ordre

$$\mathbf{G(p)} = \frac{\boldsymbol{y(p)}}{\boldsymbol{x(p)}} = \frac{\mathbf{1}}{\boldsymbol{ap^2 + bp + c}} = \frac{\boldsymbol{k\omega_0^2}}{\boldsymbol{p^2 + 2\varepsilon\omega_0 p + \omega_0^2}} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (\text{III. } 7)$$

K est appelé **gain statique** du système.

_w_0 est **la pulsation propre non amortie** du système (elle s'exprime en radians par seconde).

_G est **le facteur d'amortissement** du système.

C'est trois grandeurs suffisent à caractériser tout système du deuxième ordre :ce sont ses **grandeurs caractéristiques.**

III.4. Caractéristiques d'un système asservi

Stabilité :

- **Définition 1** : on dira qu'un système est stable si écarté de sa position d'équilibre, il y revient.
- **Dentition 2** : Un système est dit stable si sa réponse à toute entrée bornée est bornée.

- **Précision :**

C'est la capacité de l'asservissement à atteindre la consigne avec précision.

La précision statique (ou erreur de position) du système est caractérisée par l'erreur en régime permanent en réponse à un échelon :

$$\boldsymbol{\varepsilon_\infty \lim_{t\to\infty} \varepsilon(t)} \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (\text{III}.8)$$

On parlera de précision dynamique dès que l'entrée du système évolue de manière continue dans le temps : par exemple on désigne par erreur de vitesse la valeur de l'erreur quand l'entrée du système est une rampe.

- **Temps de réponse :** c'est la vitesse à laquelle la valeur finale sera atteinte.

III.5. Principe de fonctionnement

Dans la plupart des appareils et installations industrielles, tertiaires et mêmes domestiques, il est nécessaire de maintenir les grandeurs physiques à des valeurs déterminées, en dépit des variations externes ou internes influant sur ces grandeurs. Le niveau d'un réservoir d'eau, la température d'une étuve, le débit d'une conduite de gaz, étant par nature variables, doivent donc être régulés par des actions convenables sur le processus considéré.

Si les perturbations influant sur la grandeur à contrôler sont lentes ou négligeables, un simple réglage (dit en boucle ouverte) permet d'obtenir et de maintenir la valeur demandée (par exemple action sur un robinet d'eau), dans la majorité des cas, cependant, ce type de réglage n'est pas suffisant, parce que trop grossier ou instable. Il faut alors comparer, en permanence, la valeur mesurée de la grandeur réglée à celle que l'on souhaite obtenir et agir en conséquence sur la grandeur d'action, dite grandeur régulante, on a dans ce cas, constitué une boucle de régulation et plus généralement une boucle d'asservissement.

Cette boucle nécessite la mise en œuvre d'un ensemble de moyens de mesure, de traitement de signal ou de calcul, d'amplification et de commande d'actionneur, constituant une chaîne d'éléments associés à la chaîne de régulation (ou d'asservissement). [6]

Pour réguler un système physique, il faut :

- Mesurer la grandeur réglée avec un capteur.
- Réfléchir sur l'attitude à suivre : c'est la fonction du régulateur. Le régulateur compare la grandeur réglée avec la consigne et élabore le signal de commande.
- Agir sur la grandeur réglante par l'intermédiaire d'un organe de réglage. On peut représenter une régulation de la manière suivante :

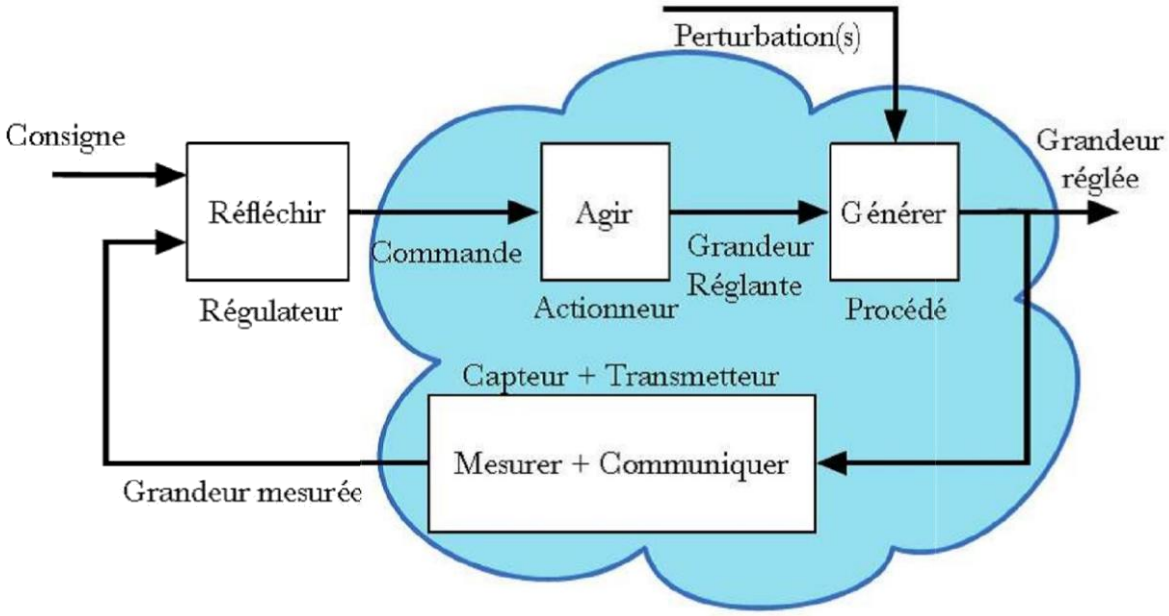


Figure III.4 Système de régulation de manière générale.

III.5.1. Régulation en boucle ouverte (Manuelle)

Dans un asservissement en boucle ouverte, l'organe de contrôle ne réagit pas à travers le processus sur la grandeur mesurée (celle-ci n'est pas contrôlée). Une régulation en boucle ouverte ne peut être mise en œuvre que si l'on connait la loi régissant le fonctionnement du processus.

Contrairement à un asservissement en boucle fermée, un asservissement en boucle ouverte permet d'anticiper les phénomènes et d'obtenir des temps de réponse très courts. De plus, il n'y a pas d'oscillation à craindre (car il s'agit d'un système dynamiquement stable).

Enfin l'asservissement en boucle ouverte est la seule solution envisageable lorsqu'il n'y a pas de contrôle final possible.

Au niveau des inconvénients, la régulation en boucle ouverte impose de connaitre la loi régissant le fonctionnement du processus, et il est très fréquent que l'on ne connaisse pas la loi en question. Autre inconvénient sérieux, il n'y a aucun moyen de contrôler, à plus forte raison de compenser, les erreurs, les dérives, les accidents qui peuvent intervenir à l'intérieur de la boucle ; autrement dit, il n'y a pas de précision ni surtout de fidélité qui dépendent de la qualité intrinsèque des composants. Enfin, la régulation en boucle ouverte ne compense pas les facteurs perturbateurs. [7]

- **Fonctionnement en boucle ouverte :**

On parle de fonctionnement en boucle ouverte quand c'est l'opérateur qui contrôle l'organe de réglage.

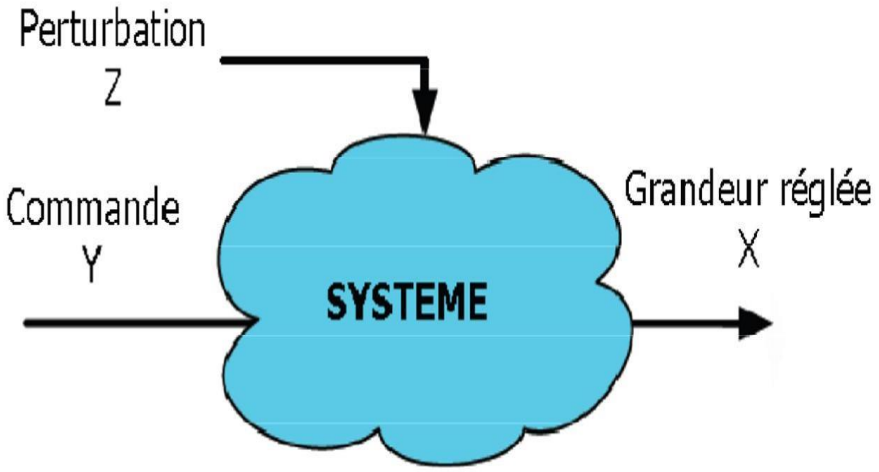


Figure III.5 Régulation en boucle ouverte.

III.5.2. Régulation en boucle fermée

Dans une régulation en boucle fermée, une bonne partie des facteurs perturbateurs sont automatiquement compensés par la contre-réaction à travers le procédé. Autre avantage, il n'est pas nécessaire de connaitre avec précision les lois, le comportement des différents composants de la boucle, et notamment du processus, bien que la connaissance des allures statistiques et dynamiques des divers phénomènes rencontrés soit utile pour le choix des composants.

Parmi les inconvénients d'une régulation en boucle fermée, il faut citer le fait que la précision et la fidélité de la régulation dépend de la fidélité et de la précision sur les valeurs mesurées et sur la consigne.

Autre inconvénient, sans doute plus important, le comportement dynamique de la boucle dépend des caractéristiques des différents composants de la boucle, et notamment du processus, enfaite un mauvais choix de certains composants peut amener la boucle à entrer en oscillation.

Enfin, la régulation en boucle fermée n'anticipe pas. Pour que la régulation envoie une commande à l'organe de contrôle, il faut que les perturbations ou les éventuelles variations de la valeur de consigne se manifestent sur la sortie du processus : ceci peut exiger un délai parfois gênant. [7]

- **Fonctionnement en boucle fermée**

C'est le fonctionnement normal d'une régulation. Le régulateur compare la mesure de la grandeur réglée et la consigne et agit en conséquence pour s'en rapprocher

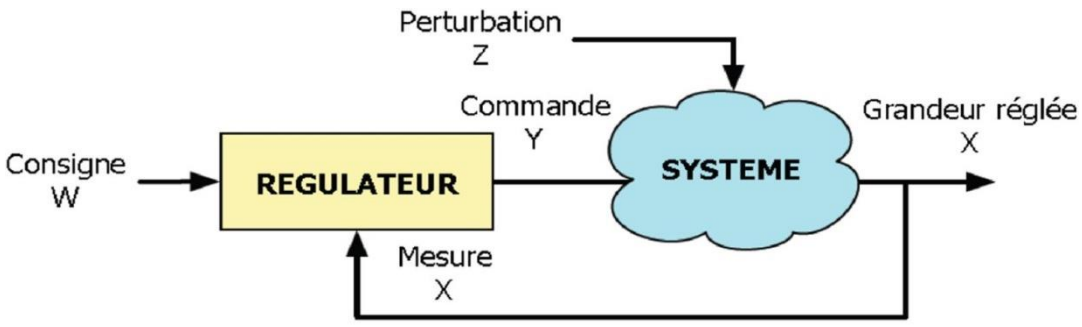


Figure III.6 Régulation en boucle fermée.

III.6. Représentation fonctionnelle d'une boucle de régulation

D'une manière générale, une boucle de régulation peut être représentée de la manière suivante :

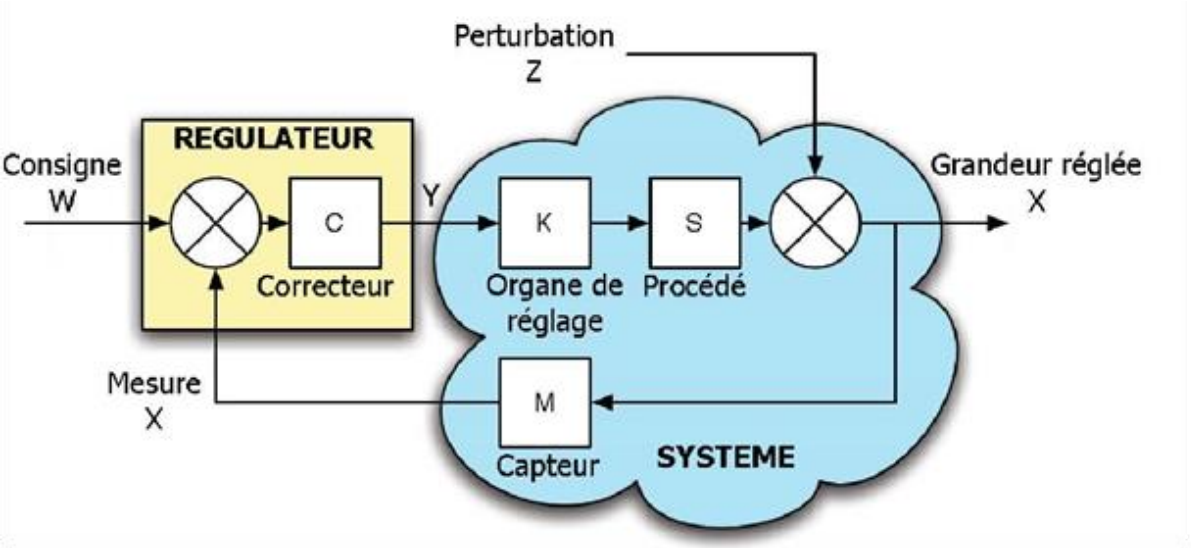


Figure III.7 Représentation fonctionnelle d'une boucle de régulation.

III.6.1. Éléments constitutifs d'une boucle de régulation

Une boucle de régulation doit comporter au minimum les éléments suivants :

- Un capteur de mesure ;
- Un transmetteur souvent intégré au capteur ;
- Un régulateur ;
- Un actionneur (organe de réglage)

✓ Le **régulateur** reçoit deux informations :

- Le signal de mesure **(X)** provenant du capteur,
- La consigne **(W)** (qui peut être locale ou externe).

En fonction de l'écart entre ces deux valeurs et de l'algorithme de calcul pour lequel il a été configuré, il délivre un signal de sortie **(Y)** dirigé vers l'actionneur (Organe de réglage) afin d'annuler cet écart et de ramener la mesure vers la valeur de consigne.

- **Schéma fonctionnel d'un régulateur**

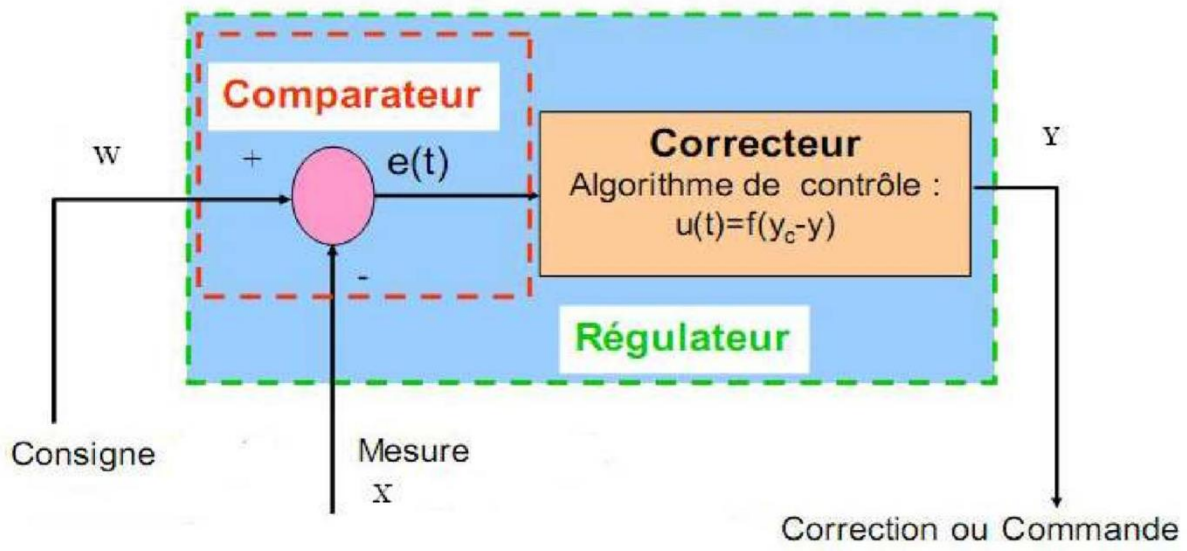


Figure III.8 schéma fonctionnel d'un régulateur.

III.7. Classification des régulateurs

Les régulateurs sont classés selon la nature de l'énergie qu'ils utilisent, le sens d'action et selon le type d'action :

III.7.1. Pneumatique : sortie 0.2 à 1 bar. Ils sont utilisés dans l'industrie chimique du gaz, ne présentent pas de danger d'explosion, de moins au moins utilisés car lents et encombrants.

Les régulateurs pneumatiques, toujours présents sur le marché, ont un aspect similaire et avec des possibilités identiques à celles des régulateurs électroniques.

Les signaux d'entrée et de sortie, sont des pressions d'air modulées, dont l'échelle est généralement 0.2 à 1 bar. La consigne externe est souvent en option.

III.7.2. Electrique : sortie 4-20 mA utilisent des signaux analogiques à base d'amplificateurs opérationnels.

Ces régulateurs utilisent une électronique analogique, à base d'amplificateurs opérationnels, ils cèdent le pas à la technologie numérique, mais sont encore nombreux dans l'industrie.

III.7.3. Electronique (numérique) : Sortie sous forme numérique. La technologie numérique permet d'avoir une grande souplesse : opération arithmétique, auto ajustage des coefficients, possibilité d'émettre ou de recevoir des données.

La différence fondamentale dans la présentation de ces régulateurs est un clavier opérateur, intégré ou indépendant (micro console), permettant d'émettre ou de recevoir des données.

La technologie numérique permet avec une grande souplesse, une extension des possibilités du régulateur :

- Traitement du signal d'entrée (extraction de racine carré, filtrage, linéarisation…)
- Mise à l'échelle (valeur et format) des indicateurs.
- Choix du type d'alarme, soit sur la mesure, soit sur l'écart,
- Affichage précis des données telles qu'actions, limites, …
- Choix du mode de dérivée, soit sur la mesure soit sur l'écart,

La technologie numérique permet, dans certains cas, au régulateur de calculer lui-même, les actions, on distingue :

- Les régulateurs auto réglant qui calculent les actions PID à un point de fonctionnement donné, et ce à partir d'une intervention humaine.
- Les régulateurs auto-adaptatifs qui calculent et ajustent en permanence les paramètres de leur algorithme (PID ou autre) en fonction de l'évolution du procédé.

• **Le sens d'action direct** - l'augmentation de la mesure provoque l'augmentation de la commande.

• **Le sens d'action inverse** - l'augmentation de la mesure provoque la diminution de la commande.

III.8. La Régulation PID

III.8.1. Définition de régulateur PID

La commande PID est dite aussi (correcteur, régulateur, contrôleur), se compose de trois termes P, I et D, d'où le 'P' correspond au terme proportionnel, 'I' pour terme intégral et 'D'pour le terme dérivé de la commande.

Les régulateurs PID sont probablement les plus largement utilisés dans le contrôle industriel, même les plus complexes systèmes de contrôle industriel peut comporter un réseau de contrôle dont le principal élément de contrôle est un module de contrôle PID.

Le régulateur PID est une simple implémentation de retour d'information (Feedback). Ila la capacité d'éliminer la compensation de l'état d'équilibre grâce à l'action intégrale, et il peut anticiper le futur grâce à une action dérivée.[8]

III.8.2. Structure d'un régulateur PID

L'idée de base d'un contrôleur PID est de lire un capteur, puis de calculer la sortie souhaitée de l'actionneur en calculant les réponses proportionnelle, intégrale et dérivée, puis en faisant la somme de ces trois composants pour calculer la sortie. Avant de définir les paramètres d'un contrôleur PID [3]. La réalisation de la boucle d'asservissement par un PID comporte deux aspects essentiels :

Le réglage du régulateur PID, pour lequel la connaissance d'un modèle dynamique du procédé d'une part et les performances désirées d'autre part déterminent le choix de la méthode de synthèse.

L'implantation du régulateur dans une version analogique ou numérique et dans une configuration série, parallèle ou mixte.

III.8.3. Principe de Régulation PID

La régulation PID est l'une des méthodes les plus répandues pour le contrôle automatique des systèmes industriels, notamment dans les systèmes de pression.

L'erreur observée est la différence entre la consigne et la mesure. Le PID permet trois actions en fonction de cette erreur :

- ✓ Une action Proportionnelle : l'erreur est multipliée par un gain *Kp ;*
- ✓ Une action Intégrale : l'erreur est intégrée sur un intervalle de temps *s*, puis multipliée par un gain *Ki ;*
- ✓ Une action Dérivée : l'erreur est drivée suivant un temps s, puis multipliée par un gain *Kd.*

Les actions dérivées et intégrales ne s'emploient jamais seules mais en combinaison avec l'action proportionnelle. [9]

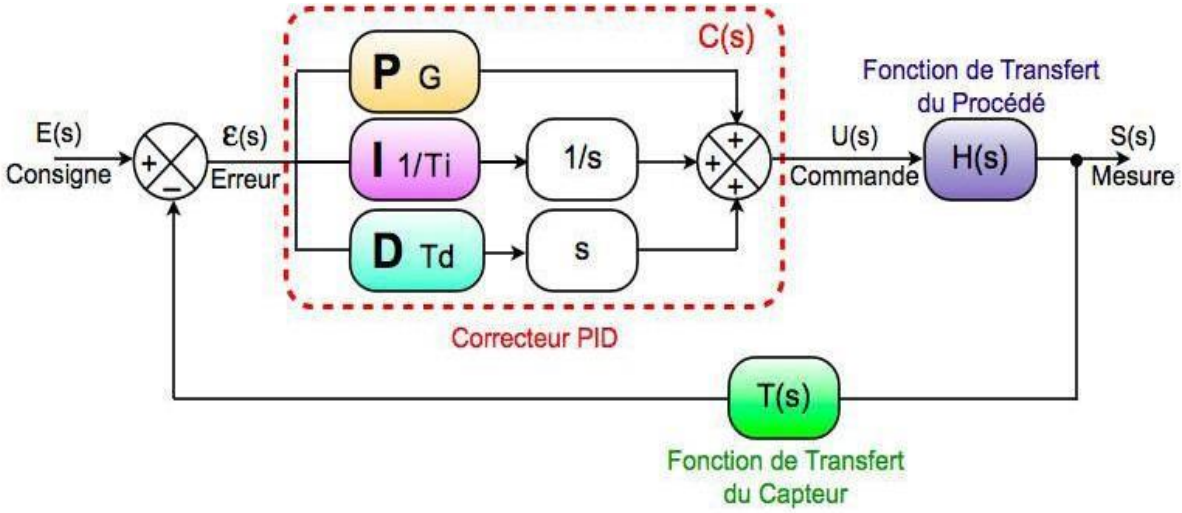


Figure III.9 Correcteur PID

III.8.4. Fonctionnement et paramètres (Proportionnel, Intégral, Dérivé)

Le régulateur PID repose sur trois actions principales :

- Action proportionnelle (P) : agit en fonction de l'écart entre la valeur mesurée et la consigne. Plus l'écart est grand, plus l'action est importante.

- Action intégrale (I) : corrige les erreurs persistantes sur le long terme en tenant compte de l'accumulation des écarts.

- Action dérivée (D) : anticipe les variations futures en se basant sur la vitesse de variation de l'erreur.

La combinaison de ces trois actions permet d'obtenir un contrôle précis et stable de la pression.

III.8.5. Formes de régulateur PID

Dans un régulateur PID, il existe plusieurs façons d'associer les paramètres P, I et D. en effet, le correcteur PID peut avoir une structure série, parallèle ou mixte, illustré dans le tableau suivant. (Voir le tableau III-1).[10]

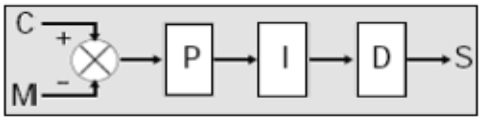
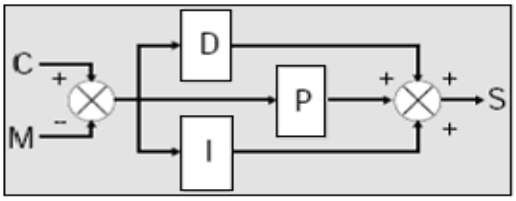
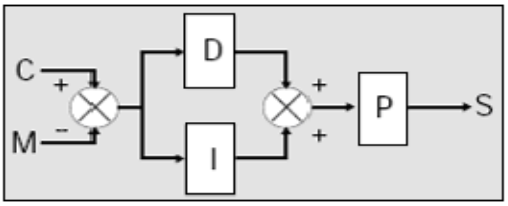
Formes de régulateur	*Schéma et fonction transfert*
Série	 $K_P\left(\frac{T_i+T_d}{T_i}+\frac{1}{pT_i}+pT_d\right)$
Paralléle	 $K_P+\frac{1}{pT_i}+pT_d$
Mixte	 $K_P\left(1+\frac{1}{pT_i}+pT_d\right)$

Tableau III.1 : Formes de régulateur PID

III.8.6. Avantages et limites du PID

- **Avantage :**

- Simplicité de mise en œuvre

- Bonne stabilité du système

- Adaptabilité à différents processus

- **Limite :**

- Sensibilité aux perturbations brusques

- Réglage des paramètres parfois complexe

- Risque d'oscillations si le réglage est inadéquat

En dépit de ces limites, la régulation PID reste une solution de référence dans le contrôle des systèmes de pression en milieu industriel.

III.9. Conclusion

La régulation automatique joue un rôle fondamental dans le bon fonctionnement des systèmes présents dans notre vie quotidienne, en assurant stabilité, performance et sécurité. Dans ce chapitre, nous avons présenté les principes de base de la régulation, en explorant les comportements des systèmes du premier et du deuxième ordre. Nous avons également introduit les différents types de régulation, en mettant particulièrement l'accent sur le régulateur PID. Ce dernier, grâce à ses trois actions (proportionnelle, intégrale et dérivative), constitue un outil puissant pour atteindre les objectifs de commande et de stabilité dans divers systèmes automatisés.

Chapitre IV

Présentation du système de régulation de pression sur le site d'étude et Présentation de la problématique

IV.1.1. Introduction

Dans le cadre de ce mémoire, il est essentiel de comprendre le fonctionnement du système de régulation en place sur le site d'étude afin de mieux cerner les enjeux techniques et organisationnels qui y sont associés. Le présent chapitre vise ainsi, dans un premier temps, à présenter de manière détaillée l'architecture et les principaux composants du système de régulation utilisé sur le site. Cette présentation servira de base pour contextualiser la problématique étudiée, qui découle directement des limites ou dysfonctionnements identifiés au sein de ce système. L'analyse de cette problématique permettra de justifier la nécessité d'une étude approfondie et de proposer, dans les chapitres suivants, des pistes d'amélioration ou de résolution adaptées aux spécificités du site.

IV.2. Hydraulique générale de canalisations de fluides

Les propriétés des gaz ont une nette influence sur les écoulements à travers les conduites, et leurs effets doivent être : pris en considération. Le calcul et l'estimation de ces propriétés seront couverts dans le cours 'Estmation of Physical Properties of Gases'.

IV.2.1. Calcul des pertes de charge dues aux frottements

Différentes méthodes de calcul seront discutées

$$\mathbf{Q} = \boldsymbol{f}\left(\boldsymbol{Propriétés}, \boldsymbol{D}, \boldsymbol{L}, \boldsymbol{P}, \boldsymbol{T}, \Delta \boldsymbol{P}_{\boldsymbol{frot}}\right)$$

IV.2.2 Equation de Bernoulli

Quand un fluide coule à travers une conduite, son énergie totale à différentes positions se compose d'énergie de pression, énergie de vitesse, et énergie de position ou élévation par rapport à une référence.

L'équation de Bernoulli relie les composantes de l'énergie du fluide en écoulement pour former une équation de conservation d'énergie

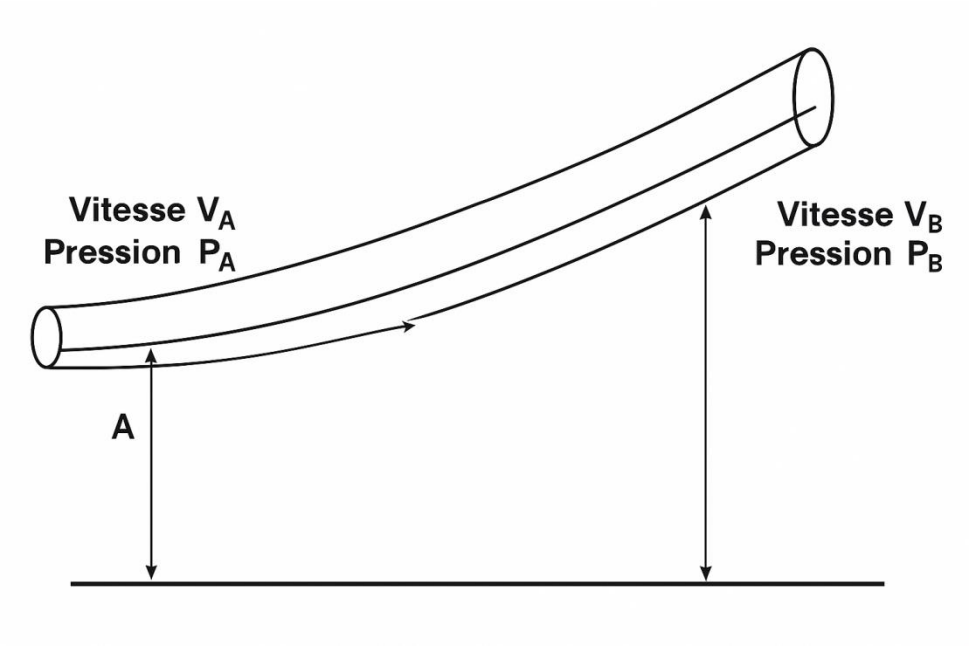


Figure IV.1 Représentation d'équation de Bernoulli

$$\mathbf{Z_A} + \frac{\boldsymbol{P_A}}{\boldsymbol{\rho g}} + \frac{\mathbf{V_A^2}}{\boldsymbol{2g}} + \boldsymbol{H_P} = \mathbf{Z_B} + \frac{\boldsymbol{P_B}}{\boldsymbol{\rho g}} + \frac{\mathbf{V_B^2}}{\boldsymbol{2g}} + \boldsymbol{h_f} \quad \text{.....(IV. 1)}$$

H_p : hauteur équivalente ajoutée au fluide par une machine (compresseur ou pompe) au point A.
H_f : pertes de charges totales (linéaires & singulières) dus au frottement entre A et B.

A l'aide des lois des gaz (parfaits ou réels) et l'équation précédente de Bernoulli, différentes formules ont été développées afin de prédire la performance d'un pipeline transportant du gaz. Ces formules montrent la relation entre les propriétés du gaz, (densité, facteur de compressibilité) débit, diamètre et longueur du pipe, et les pertes de charges.

Des simplifications sont parfois introduites afin de faciliter les calculs manuels. Les simplifications les plus classiques sont la constance de la température et un transfert de chaleur négligeable entre le pipe et l'environnement (pipes enterrés).

Avec les moyens actuels de calculs tels que les ordinateurs il n'est pas difficile d'omettre les simplifications précitées et prendre en considération tous les paramètres intervenants ayant une influence directe sur la précision des résultats.

IV.2.3. Hydraulique du Gaz Naturel [11]

Afin de minimiser le coût annuel de la compression pour le transport de gaz dans un pipeline, le designer doit estimer avec le plus de précision possible les pertes de charge calculées conventionnellement (l'aide de plusieurs corrélations obtenues) partir de l'équation d'énergie mécanique (Equation de Bernoulli) qui relie les pertes de charge au débit.

$$\mathbf{u}du + \frac{dP}{\rho} + gdh + f\frac{dx}{D}\frac{u^2}{2} = 0 \quad \ldots\ldots \text{(IV.2)}$$

(1) (2) (3) (4)

u : Vitesse du fluide ; **P** : pression ; ρ : densité ;

g : acc. Pesanteur ; ***d*h** : variation d'élévation

f : coef. de frottement Darcy ; **D** : diamètre du pipe

***d*x** : changement de longueur du pipe

(1) Energie cinétique (EC) ; (2) : énergie de pression ;

(3) Énergie potentielle ; (4) : pertes de charge dues aux frottements

Intégration de l'équation (A):

L'énergie cinétique due aux mouvements moléculaires est négligeable par rapport aux forces de frottements, donc l'intégration de CE tend vers zéro.

$$\int_{P_1}^{P_2} \rho dp = \int_{P_1}^{P_2} \rho dp \frac{PM}{ZRT} dP = \frac{M}{Z_{avg}RT_{avg}} \int_{P1}^{P2} PdP = \frac{M}{Z_{avg}RT_{avg}} \left\{\frac{P_1^2 - P_2^2}{2}\right\} \ldots\ldots \text{(IV.3)}$$

Terme d'énergie potentielle

$$\int_{Z_1}^{Z_2} \rho^2 gdz = \int_{Z_1}^{Z_2} \left[\frac{PM}{ZRT}\right]^2 gdz = \frac{gM^2P_{avg}^2}{Z_{avg}^2R^2T_{avg}^2}(Z_2 - Z_1) \ldots\ldots \text{(IV.4)}$$

Terme de frottement

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{fC^2}{2D} dx = f\frac{(x_1 - x_2)}{D}\frac{C^2}{2} = f\frac{L}{D}\frac{C^2}{2} \ldots\ldots \text{(IV.5)}$$

Après intégration, C a les unités suivantes qui sont les unités d'un débit massique par unité de surface :
Donc [C] = [kg/(sec-m2)]

$$\mathbf{C^2 = \frac{\rho_b^2 Q_b^2}{2} = \frac{16 P_b^2 M^2 Q_b^2}{\pi^2 D^4 Z^2 R^2 T_b^2}} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (\mathbf{IV.6})$$

$\boldsymbol{Q_b}$: débit volumique aux condition standard

$\boldsymbol{\rho_b}$: masse volumique aux condition standard

$\boldsymbol{A, D}$: Surface et diametre de section du pipe

$\boldsymbol{P_b}, \mathbf{T_b}$: Condition de référence standar

$\boldsymbol{M = M_{air} d}$: Poid moléculaire du gaz

$\boldsymbol{d}$: densité , z: facteur de compressibilité

$\mathbf{M_{air}} = 29\,\mathrm{g/g-mol}$

IV.2.4. Equation Générale d'écoulement [11]

Equation fondamentale :
-Stationnaire
-Isotherme : Tm Constante
-Z1- Z2 = 0
-Z : facteur de compressibilité constant
-Changement en énergie cinétique négligeable
-Coefficient de frottement constant

$$\mathbf{Q = 1.1494 \times 10^{-3} \left(\frac{T_b}{P_b}\right)\left(\frac{P_1^2 P_2^2}{dT_m LZf}\right)^{0.5} D^{2.5}} \dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots\dots (\mathbf{IV.7})$$

Q : débit du gaz mesuré dans des conditions standard [$\mathrm{m}^3/jour$]

f : coefficient t de frottement

$\boldsymbol{P_b}$: Pression standard = $1.013\times10^5 Pa$

$\boldsymbol{T_b}$: Température standard =$15^{\circ}C$

$\boldsymbol{P_1}$: Pression d'entrée (amont), [Kpa], P_2 : Pression de sortie (aval) [Kpa]

d : densité, T_{mb} : Température moyenne d'écoulement, [K]

Z : facteur de compressibilité du gaz a la température de service

D : diamètre intérieur du pipe, [mm], L : longueur du pipe [Km]

$\boldsymbol{T_m}$: Température absolue moyenne du gaz

IV.3. Description générale du système

Le système de régulation de pression sur le site d'étude (Terminal Arrivé Oued Saf-Saf) est conçu pour assurer le maintien et l'ajustement de la pression du gaz dans les différentes sections du réseau industriel. Ce système est essentiel pour garantir la stabilité du processus et la sécurité des installations. Il est constitué principalement de capteurs de pression, de vannes de régulation, d'actionneurs, ainsi que d'une unité de contrôle automatisée.

IV.4. Fonctionnement du système

Le système fonctionne sur la base d'une mesure continue de la pression aux points critiques du réseau. Les capteurs de pression transmettent les valeurs mesurées vers l'unité de contrôle, qui analyse les données en temps réel. En cas de variation de la pression par rapport à la consigne, des ordres sont envoyés aux actionneurs pour ajuster l'ouverture des vannes de régulation. Cela permet de stabiliser la pression et d'assurer un flux constant de gaz selon les exigences opérationnelles.

IV.5. Illustrations et schémas du système

Des schémas techniques du système de régulation de pression seront insérés pour illustrer la disposition des composants et le cheminement du gaz. Des photos prises sur le site d'étude accompagneront ces schémas afin de mieux visualiser les équipements en place et leur intégration dans l'installation industrielle.

IV.5.1. Architecture et composants du système [12]

La figure suivante illustre l'architecture générale du système de régulation de pression sur le site d'étude. Elle représente le flux des données et des commandes, partant de l'ordinateur de supervision, traversant les équipements réseau (switches), jusqu'au contrôleur logique programmable (PLC), pour aboutir finalement aux vannes de régulation de pression (PCV).

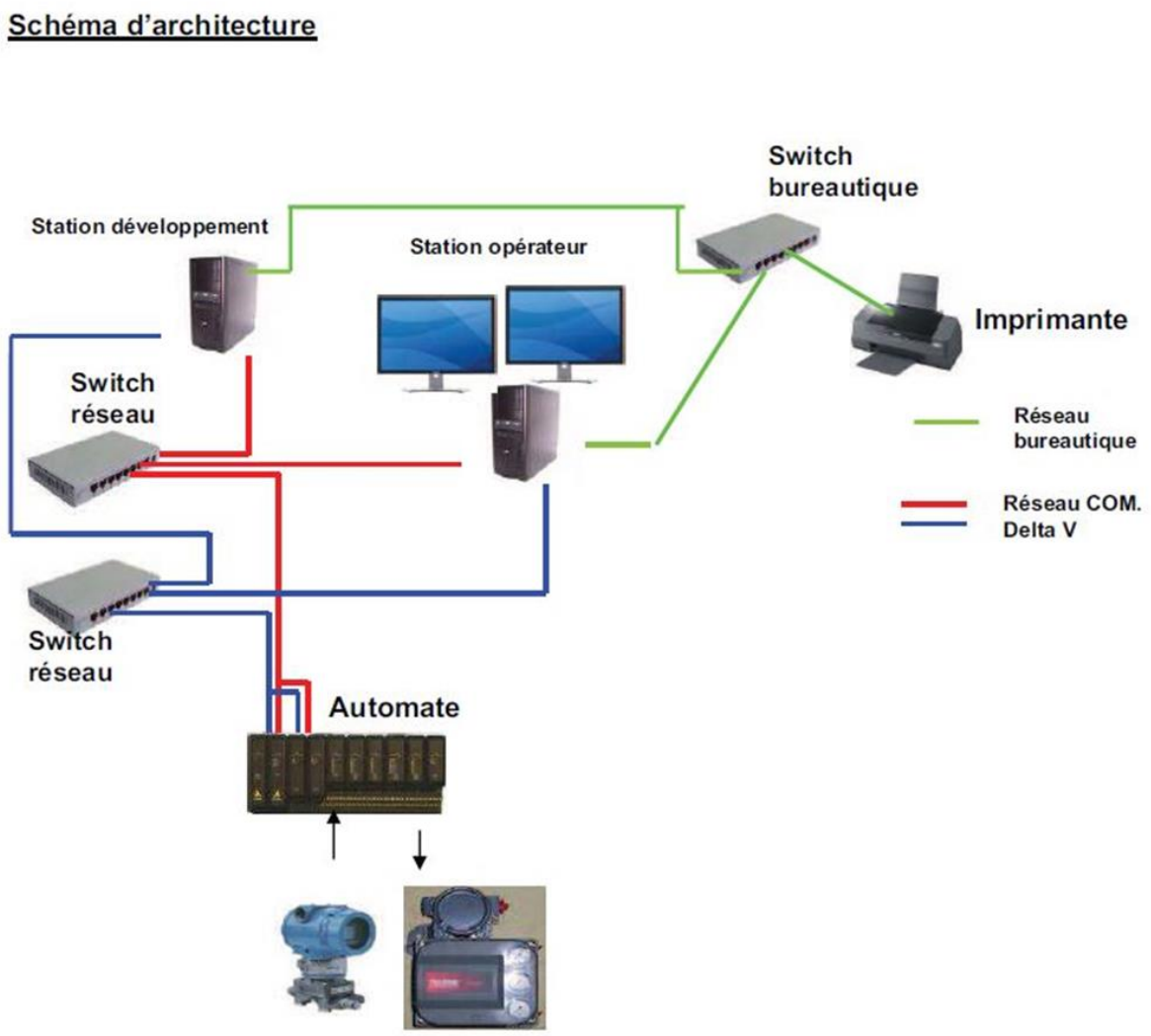


Figure IV.2Architecture générale du système de régulation de pression du site d'étude

IV.5.2. ARAIGNEE DE CABLAGE GLOBALE DU PROJET [12]

Le schéma ci-dessus illustre la distribution générale du câblage dans le projet et son interaction avec le système SCADA. Le raccordement commence depuis la salle de contrôle, où toutes les opérations sont surveillées et contrôlées, puis les signaux sont envoyés à travers le réseau de câblage vers le terrain. Sur le terrain, le câblage se connecte aux capteurs de pression et aux vannes de régulation de pression (PCV), assurant ainsi une communication efficace entre les différents éléments du système. Ce design vise à garantir une intégration fluide entre les composants, assurant ainsi la stabilité et l'efficacité du contrôle de la pression.

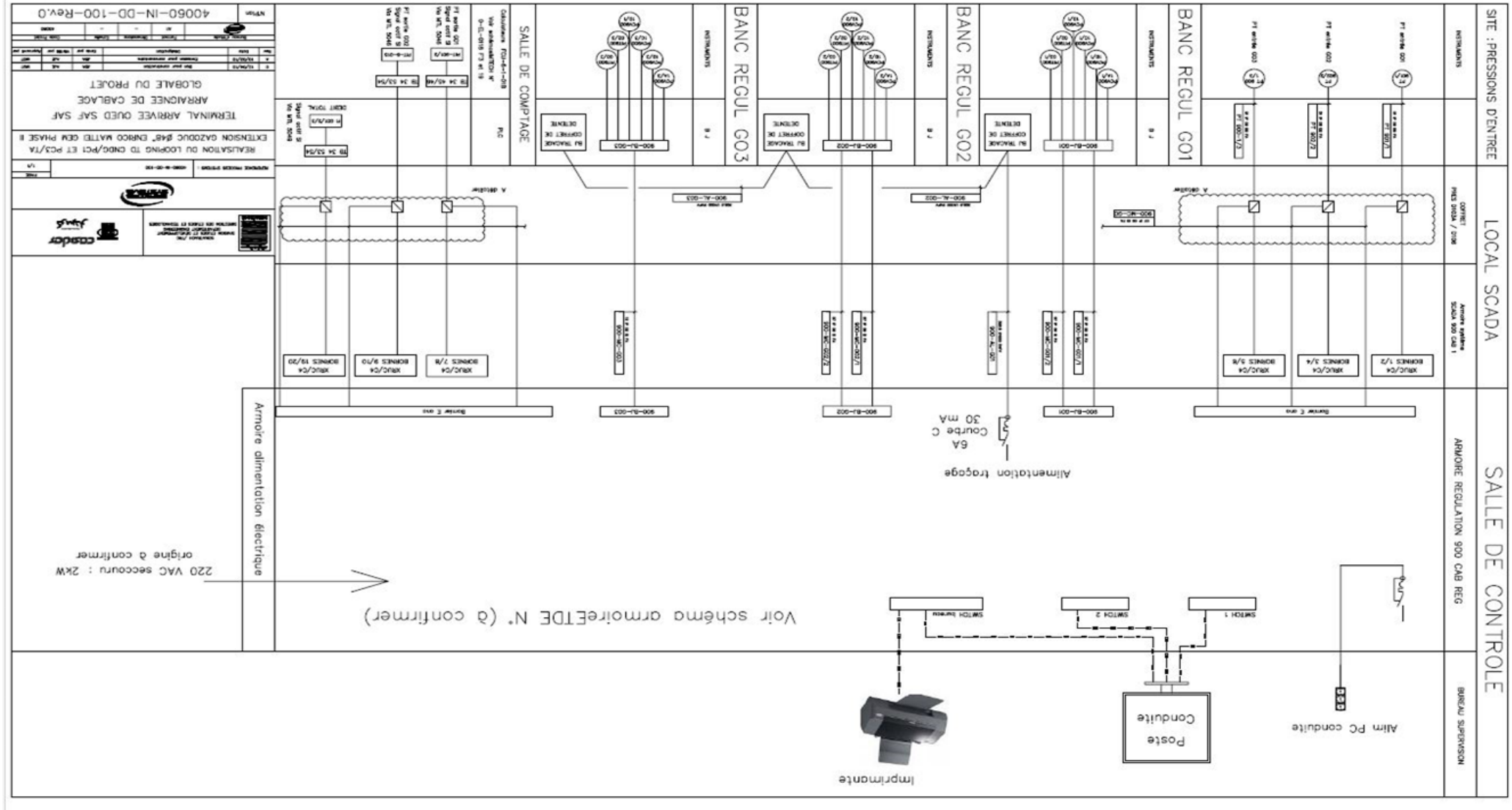


Figure IV.3 Araignée de câblage globale du projet

IV.5.3. Schéma d'implantation des groupes de 5 PCV sur le site gazier

Le schéma ci-dessous illustre la disposition des vannes de régulation de pression (PCV – Pressure Control Valves) sur le site gazier faisant l'objet de cette étude. Le site comprend un total de 15 PCV, regroupées en trois ensembles de 5 vannes chacune. Chaque groupe est implanté sur une section spécifique du réseau de conduites afin d'assurer un contrôle optimal de la pression. Ce schéma vise à montrer l'organisation spatiale des groupes sur le site et leur intégration dans le système global de transport et de régulation du gaz. [12]

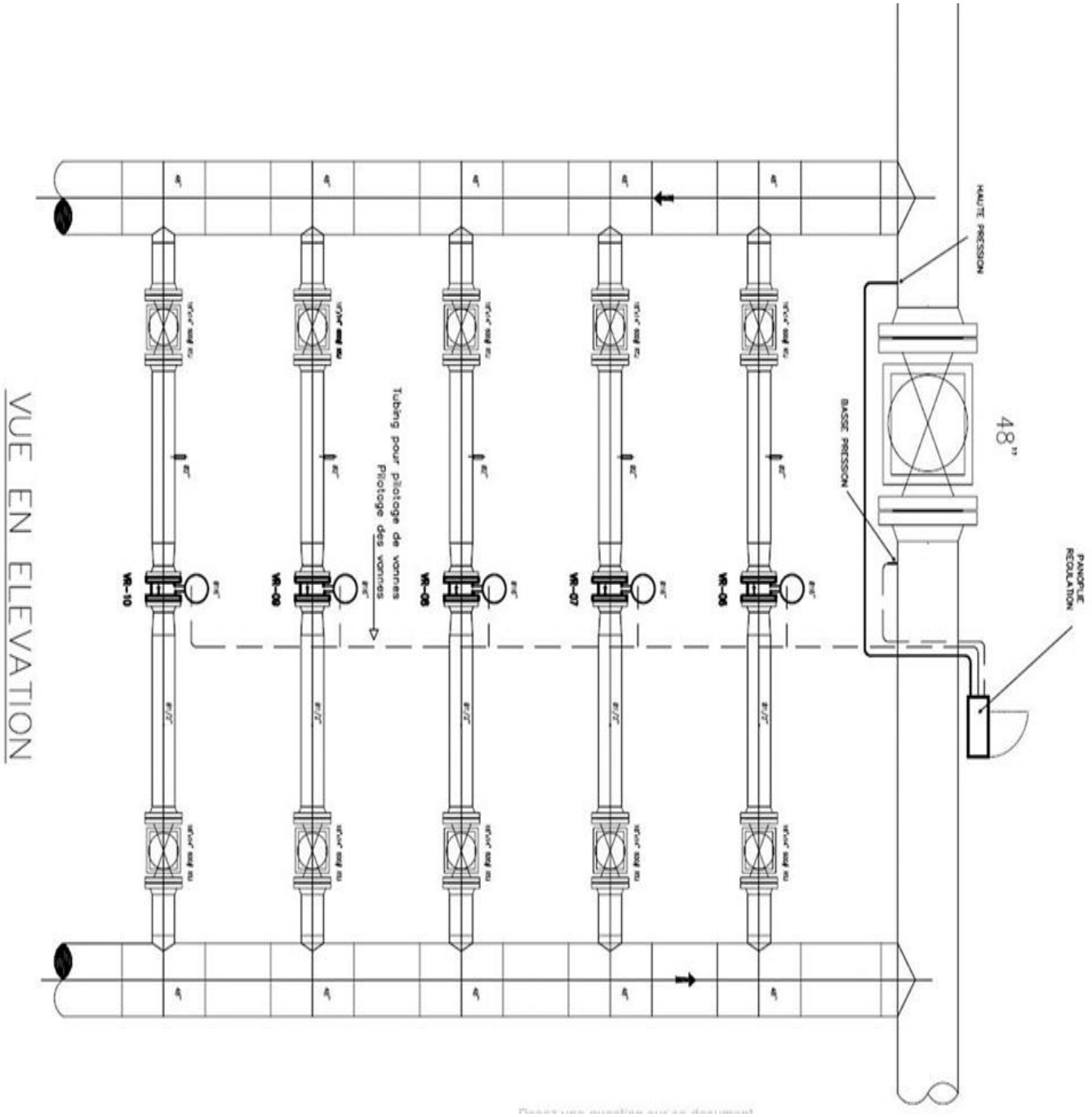


Figure IV.4 Schéma d'implantation des groupes de 5 PCV sur le site gazier.



Figure IV.5 Schéma d'implantation des PCV sur le site gazier

IV.5.4. Vue détaillée des composants d'une vanne PCV

Les deux figures ci-dessous présentent les principaux composants d'une vanne de régulation de pression (PCV – Pressure Control Valve). La première figure offre une vue éclatée annotée des différentes parties de la vanne, tandis que la seconde illustre une coupe transversale d'une vanne à boisseau sphérique intégrée dans le système de régulation.

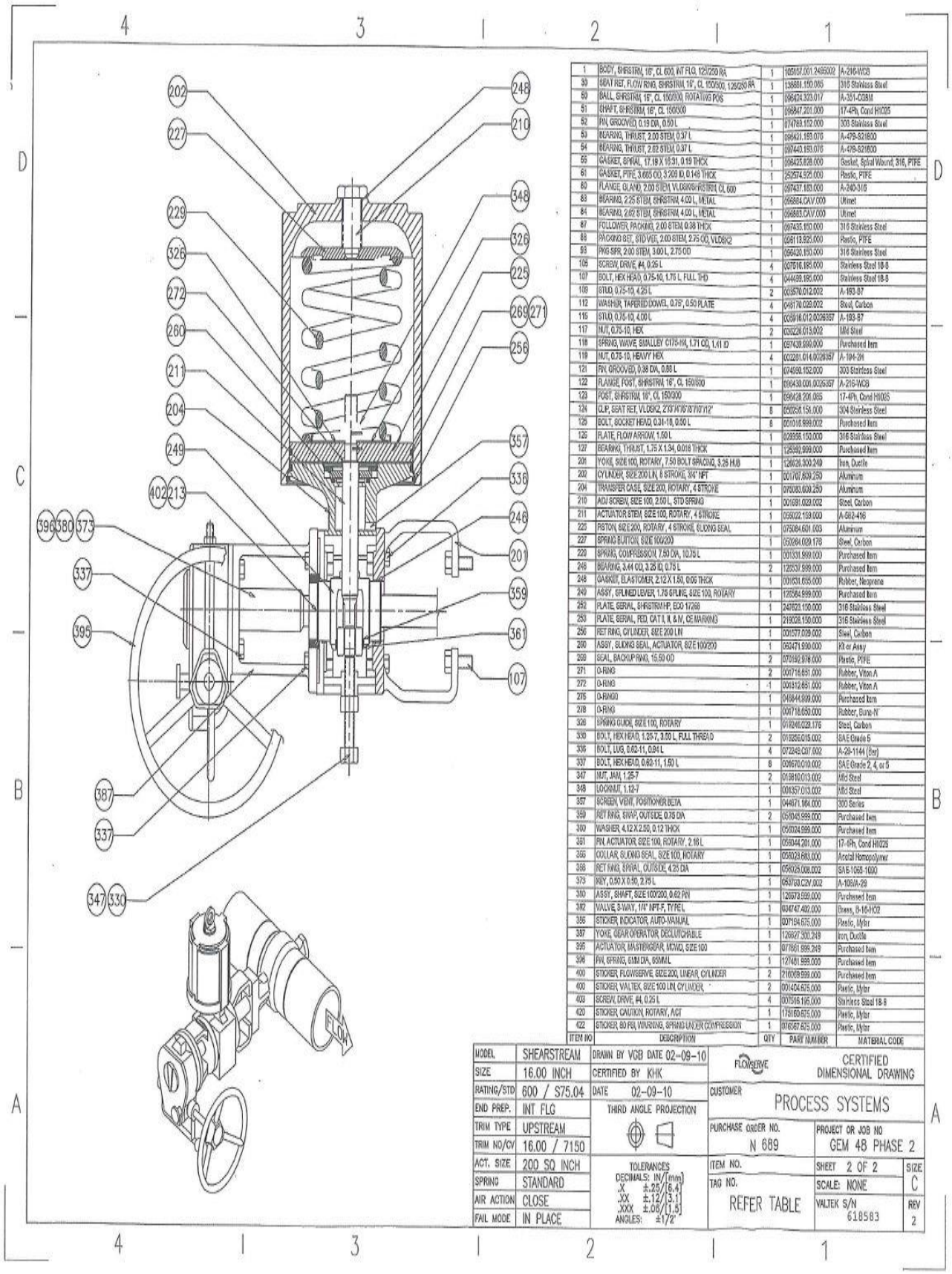
Ces illustrations permettent d'identifier :

- Le corps de la vanne
- Le siège et l'obturateur (boisseau sphérique)
- Le ressort de rappel
- Le diaphragme ou le piston
- Le servomoteur
- Les raccordements d'entrée et de sortie
- Les capteurs de pression intégrés

Ces schémas sont indispensables pour appréhender le fonctionnement interne de la vanne et le rôle de chaque composant dans la stabilisation de la pression.



Figure IV.6 Vanne de régulation (PCV)



ITEM NO	DESCRIPTION	QTY	PART NUMBER	MATERIAL CODE
1	BODY, SHRSTRM, 16", CL 600, INT FLG, 125/250 RA	1	165157.001.2495002	A-216-WCB
50	SEAT RET, FLOW RING, SHRSTRM, 16", CL 150/300, 125/250 RA	1	138881.150.065	316 Stainless Steel
50	BALL, SHRSTRM, 16", CL 150/300, ROTATING POS	1	066424.323.017	A-351-CD8M
51	SHAFT, SHRSTRM, 16", CL 150/300	1	066847.201.000	17-4Ph, Cond H1025
52	PIN, GROOVED, 0.19 DIA, 0.50 L	1	074788.152.000	303 Stainless Steel
53	BEARING, THRUST, 2.00 STEM, 0.37 L	1	066421.193.076	A-479-921600
54	BEARING, THRUST, 2.02 STEM, 0.37 L	1	007440.193.076	A-479-921600
55	GASKET, SPIRAL, 17.19 X 16.91, 0.19 THICK	1	066425.828.000	Gasket, Spiral Wound, 316, PTFE
61	GASKET, PTFE, 3.665 OD, 3.209 ID, 0.148 THICK	1	252574.925.000	Plastic, PTFE
80	FLANGE, GLAND, 2.00 STEM, VLDSKR/SHRSTRM, CL 600	1	097437.183.000	A-240-316
83	BEARING, 2.25 STEM, SHRSTRM, 4.00 L, METAL	1	066884.CAV.000	Ulmet
84	BEARING, 2.62 STEM, SHRSTRM, 4.00 L, METAL	1	066883.CAV.000	Ulmet
87	FOLLOWER, PACKING, 2.00 STEM, 0.88 THICK	1	097435.150.000	316 Stainless Steel
88	PACKING SET, STD VEE, 2.00 STEM, 2.75 OD, VLDSK2	1	098139.925.000	Plastic, PTFE
93	PKG SPR, 2.00 STEM, 3.00 L, 2.75 OD	1	066420.150.000	316 Stainless Steel
105	SCREW, DRIVE, #4, 0.25 L	4	007516.185.000	Stainless Steel 18-8
107	BOLT, HEX HEAD, 0.75-10, 1.75 L, FULL THD	4	044698.185.000	Stainless Steel 18-8
109	STUD, 0.75-10, 4.25 L	2	003570.012.002	A-193-B7
112	WASHER, TAPERED DOWEL, 0.75", 0.50 PLATE	4	048170.028.002	Steel, Carbon
115	STUD, 0.75-10, 4.00 L	4	003916.012.0026357	A-193-B7
117	NUT, 0.75-10, HEX	2	030226.013.002	Mild Steel
118	SPRING, WAVE, BELLEY C175-H4, 1.71 OD, 1.41 ID	1	097439.999.000	Purchased Item
119	NUT, 0.75-10, HEAVY HEX	4	002281.014.0026357	A-194-2H
121	PIN, GROOVED, 0.38 DIA, 0.88 L	1	074589.152.000	303 Stainless Steel
122	FLANGE, POST, SHRSTRM, 16", CL 150/600	1	099438.001.0026357	A-216-WCB
123	POST, SHRSTRM, 16", CL 150/300	1	099438.201.065	17-4Ph, Cond H1025
124	CLIP, SEAT RET, VLDSK2, 2"/3"/4"/6"/8"/10"/12"	8	050256.151.000	304 Stainless Steel
125	BOLT, SOCKET HEAD, 0.31-18, 0.50 L	8	001016.999.002	Purchased Item
126	PLATE, FLOW ARROW, 1.50 L	1	029356.150.000	316 Stainless Steel
127	BEARING, THRUST, 1.75 X 1.34, 0.018 THICK	1	128392.999.000	Purchased Item
201	YOKE, SIZE 100, ROTARY, 7.50 BOLT SPACING, 3.25 HUB	1	126626.300.249	Iron, Ductile
202	CYLINDER, SIZE 200 LIN, 6 STROKE, 3/4" NPT	1	001701.809.250	Aluminum
204	TRANSFER CASE, SIZE 200, ROTARY, 4 STROKE	1	070283.009.250	Aluminum
210	ADJ SCREW, SIZE 100, 2.50 L, STD SPRING	1	001691.023.002	Steel, Carbon
211	ACTUATOR STEM, SIZE 100, ROTARY, 4 STROKE	1	056022.193.000	A-582-416
225	PISTON, SIZE 200, ROTARY, 4 STROKE, SLIDING SEAL	1	075084.601.003	Aluminum
227	SPRING BUTTON, SIZE 100/200	1	050084.029.176	Steel, Carbon
229	SPRING, COMPRESSION, 7.50 DIA, 10.75 L	1	001331.999.000	Purchased Item
246	BEARING, 3.44 OD, 3.25 ID, 0.75 L	2	128537.999.000	Purchased Item
248	GASKET, ELASTOMER, 2.12 X 1.50, 0.06 THICK	1	001631.695.000	Rubber, Neoprene
249	ASSY, SPLINED LEVER, 1.75 SPLINE, SIZE 100, ROTARY	1	120584.999.000	Purchased Item
252	PLATE, SERIAL, SHRSTRM/HP, ECO 17268	1	247621.100.000	316 Stainless Steel
253	PLATE, SERIAL, FED, CAT I, II, & IV, CE MARKING	1	219028.150.000	316 Stainless Steel
256	RET RING, CYLINDER, SIZE 200 LIN	1	001577.029.002	Steel, Carbon
260	ASSY, SLIDING SEAL, ACTUATOR, SIZE 100/200	1	063471.900.000	Kit or Assy
269	SEAL, BACKUP RING, 16.59 OD	2	070192.976.000	Plastic, PTFE
271	O-RING	2	001716.651.000	Rubber, Viton A
272	O-RING	1	001312.651.000	Rubber, Viton A
275	O-RING	1	040844.999.000	Purchased Item
278	O-RING	1	001716.650.000	Rubber, Buna-N
326	SPRING GUIDE, SIZE 100, ROTARY	1	018246.029.176	Steel, Carbon
330	BOLT, HEX HEAD, 1.25-7, 3.50 L, FULL THREAD	2	019266.015.002	SAE Grade 5
336	BOLT, LUG, 0.62-11, 0.94 L	4	072248.037.002	A-29-1144 (Gr)
337	BOLT, HEX HEAD, 0.62-11, 1.50 L	8	001670.010.002	SAE Grade 2, 4, or 5
347	NUT, JAM, 1.25-7	2	019810.013.002	Mild Steel
348	LOCKNUT, 1.12-7	1	001357.013.002	Mild Steel
357	SCREEN, VENT, POSITIONER, BETA	1	044871.164.000	300 Series
359	RET RING, SNAP, OUTSIDE, 0.75 DIA	2	050045.999.000	Purchased Item
360	WASHER, 4.12 X 2.50, 0.12 THICK	1	050024.999.000	Purchased Item
361	PIN, ACTUATOR, SIZE 100, ROTARY, 2.16 L	1	059044.201.000	17-4Ph, Cond H1025
366	COLLAR, SLIDING SEAL, SIZE 100, ROTARY	1	059023.683.000	Acetal Homopolymer
368	RET RING, SPIRAL, OUTSIDE, 4.25 DIA	1	056028.008.002	SAE 1065-1090
373	KEY, 0.50 X 0.50, 2.75 L	1	063733.CAV.002	A-108/A-29
380	ASSY, SHAFT, SIZE 100/200, 0.62 PIN	1	120573.999.000	Purchased Item
382	VALVE, 3-WAY, 1/4" NPT-F, TYPE L	1	604747.402.000	Brass, B-16-HC2
386	STICKER, INDICATOR, AUTO-MANUAL	1	007194.675.000	Plastic, Mylar
387	YOKE, GEAR OPERATOR, DECLUTCHABLE	1	126627.300.249	Iron, Ductile
395	ACTUATOR, MASTERGEAR, MDMQ, SIZE 100	1	077861.999.249	Purchased Item
396	PIN, SPRING, 6MM DIA, 65MM L	1	127481.999.000	Purchased Item
400	STICKER, FLOWSERVE, SIZE 200, LINEAR, CYLINDER	2	216008.999.000	Purchased Item
400	STICKER, VALTEK, SIZE 100 LIN, CYLINDER	2	001404.675.000	Plastic, Mylar
403	SCREW, DRIVE, #4, 0.25 L	4	007516.185.000	Stainless Steel 18-8
420	STICKER, CAUTION, ROTARY, ACT	1	178169.675.000	Plastic, Mylar
422	STICKER, 80 PSI, WARNING, SPRING UNDER COMPRESSION	1	076567.675.000	Plastic, Mylar

MODEL	SHEARSTREAM	DRAWN BY VGB DATE 02-09-10	FLOWSERVE — CERTIFIED DIMENSIONAL DRAWING
SIZE	16.00 INCH	CERTIFIED BY KHK	
RATING/STD	600 / S75.04	DATE 02-09-10	CUSTOMER: PROCESS SYSTEMS
END PREP.	INT FLG	THIRD ANGLE PROJECTION	
TRIM TYPE	UPSTREAM		PURCHASE ORDER NO.: N 689 — PROJECT OR JOB NO: GEM 48 PHASE 2
TRIM NO/CV	16.00 / 7150		
ACT. SIZE	200 SQ INCH	TOLERANCES DECIMALS: IN/[mm] .X ±.25/[6.4] .XX ±.12/[3.1] .XXX ±.06/[1.5] ANGLES: ±1/2°	ITEM NO. — SHEET 2 OF 2 — SIZE C
SPRING	STANDARD		TAG NO.: REFER TABLE — SCALE: NONE
AIR ACTION	CLOSE		VALTEK S/N: 618583 — REV 2
FAIL MODE	IN PLACE		

Figure IV. 7 Vue détaillée des composants d'une vanne PCV

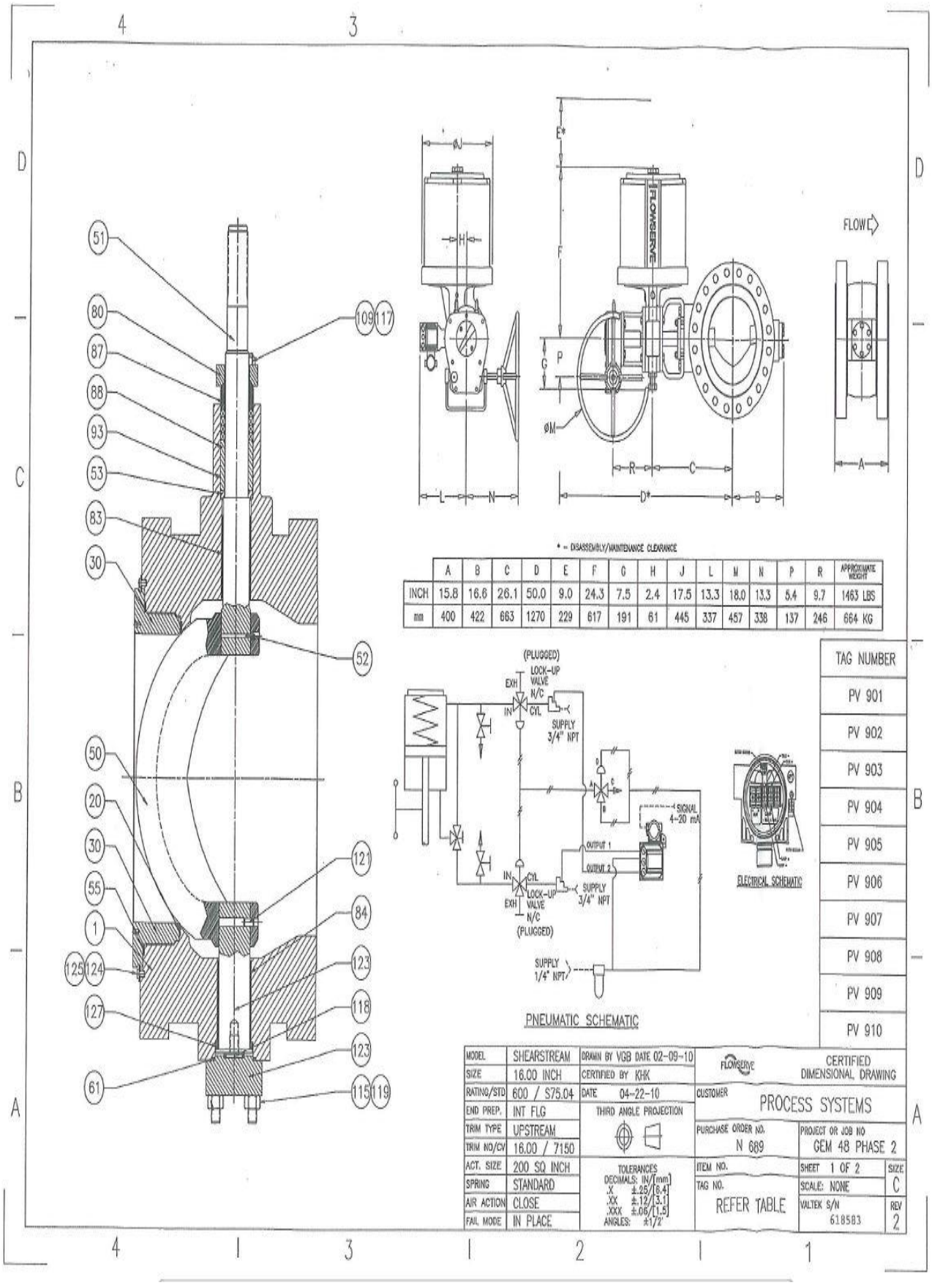


Figure IV.8 Vue détaillée des composants d'une vanne PCV

IV.5.5. Interface principale du programme de contrôle de la pression [12]

La figure IV.4.5 ci-dessous représente l'interface principale du programme de contrôle et de supervision des vannes de régulation de pression (PCV), déployé sur le site gazier concerné par notre étude. Cette interface constitue un outil essentiel pour les opérateurs, leur permettant d'avoir une vision globale et instantanée sur l'état des vannes ainsi que sur les valeurs de pression aux différents points du réseau.

Sur l'interface, on peut clairement distinguer les 15 vannes de régulation (PCV), réparties sur les trois pipelines de gaz. Chaque vanne est représentée par un indicateur prenant l'une des trois couleurs suivantes :

- Vert : La vanne est ouverte.

- Rouge : La vanne est fermée.

- Bleu : La vanne est en maintenance, signalant aux opérateurs qu'elle est hors service temporairement.

En plus de l'état des vannes, l'interface affiche plusieurs données cruciales permettant de surveiller en continu le bon fonctionnement du système :

- La pression d'entrée de chaque pipeline : Il s'agit de la pression mesurée à l'entrée de l'installation, indiquant la force d'arrivée du gaz dans le réseau.
- La pression de sortie de chaque pipeline : Cette valeur renseigne sur la pression du gaz en sortie, après passage à travers les vannes et les différents équipements.
- Le mode de fonctionnement de chaque vanne : Chaque vanne peut fonctionner soit en mode automatique, où l'ouverture est contrôlée directement par le système selon les consignes programmées, soit en mode manuel, où l'opérateur ajuste lui-même l'ouverture de la vanne selon les besoins d'exploitation.
- Le pourcentage d'ouverture de chaque vanne : Pour chaque PCV, deux valeurs sont présentées :
  - L'ouverture réelle : C'est la position réelle de la vanne sur le terrain, exprimée en pourcentage (0% pour fermer, 100% pour totalement ouvert).
  - La consigne envoyée : Il s'agit de la valeur théorique d'ouverture que le système commande à la vanne. Toute divergence entre l'ouverture réelle et la consigne peut indiquer un problème nécessitant l'intervention de l'opérateur.

Cette interface regroupe donc l'ensemble des paramètres permettant aux agents d'assurer la stabilité de la pression sur les trois lignes de gaz. Elle facilite la détection rapide d'éventuelles anomalies, telles qu'une vanne bloquée, une pression anormale, ou une différence entre la commande et la position réelle d'un organe de régulation.

Ainsi, elle constitue un élément central dans la gestion en temps réel des flux de gaz sur le site.

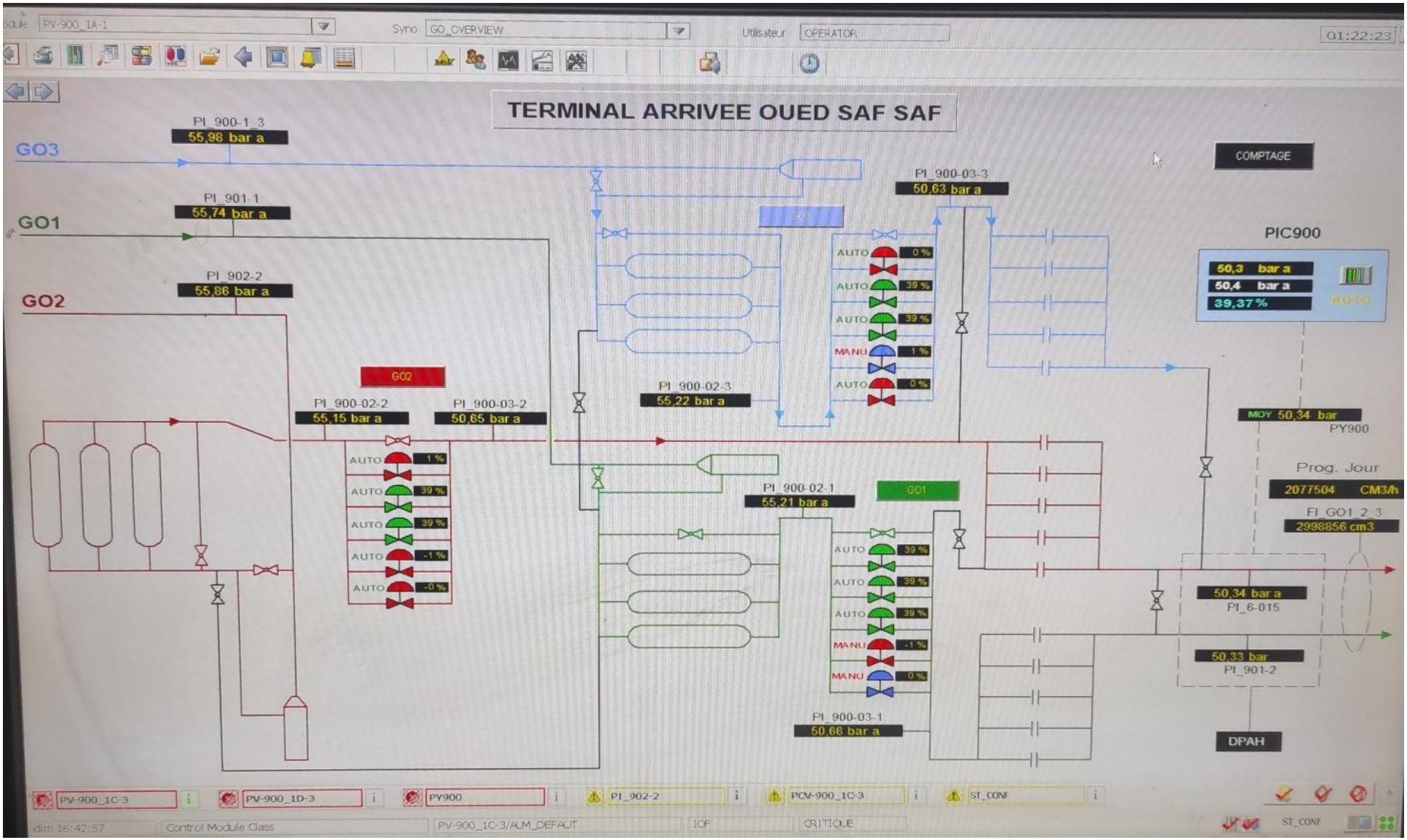


Figure IV.9 Interface principale du programme de contrôle de pression

IV.5.6. Fenêtre de suivi d'une vanne PCV

La figure ci-dessous montre une fenêtre dédiée à la surveillance d'une vanne de régulation de pression (PCV). Elle affiche :

- Le nom de la vanne
- Son état (ouverte, fermée, en maintenance)
- Le pourcentage d'ouverture réelle
- La consigne envoyée par le système

Cette fenêtre permet aux opérateurs de comparer l'ouverture réelle avec la consigne pour s'assurer du bon fonctionnement de la vanne**.**

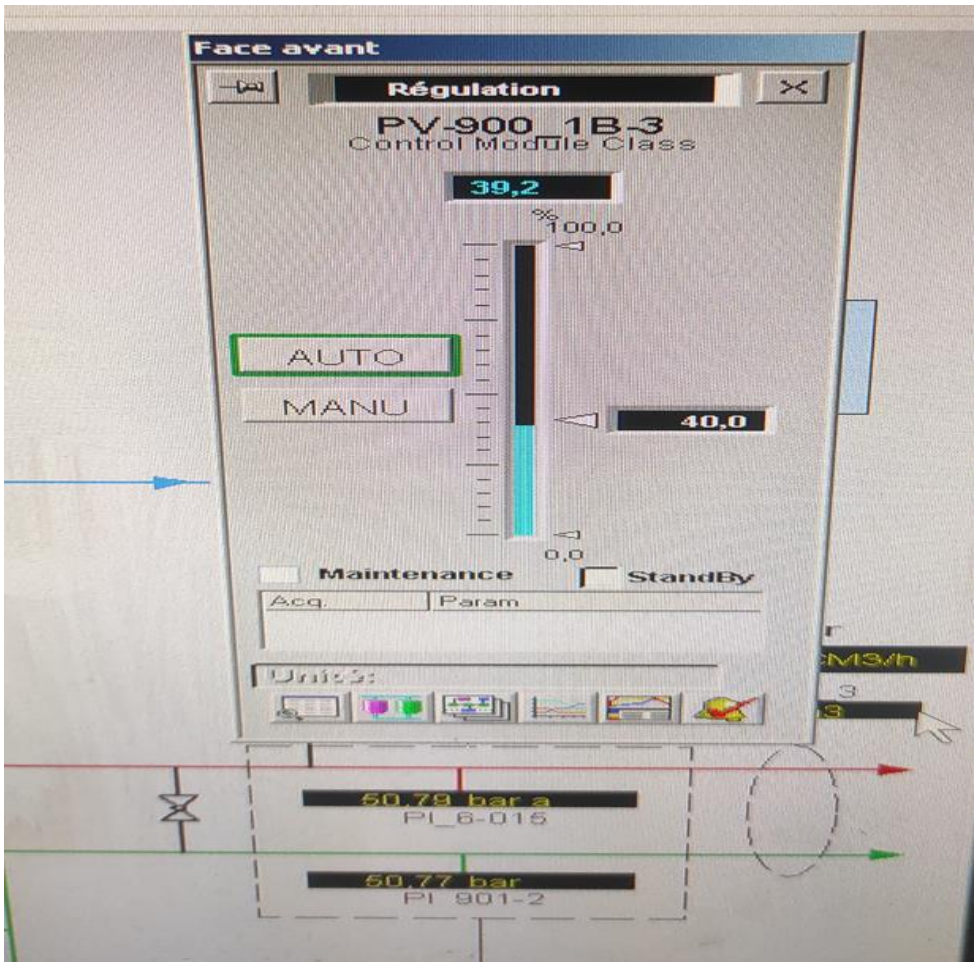


Figure IV.10 Fenêtre de suivi d'une vanne PCV

IV.5.7. Fenêtre de commande générale du système de régulation de pression

La figure ci-dessous illustre la fenêtre de contrôle général du système de régulation de pression sur le site gazier. À travers cette interface, l'opérateur peut :

- Définir la consigne de pression de sortie souhaitée pour le gaz sur chaque pipeline.
- Basculer le système en mode manuel, permettant à l'opérateur de régler manuellement le pourcentage d'ouverture de chaque vanne PCV.

Cette interface est essentielle pour adapter les réglages en cas de dysfonctionnement du mode automatique ou lors d'opérations spécifiques sur le réseau**.**

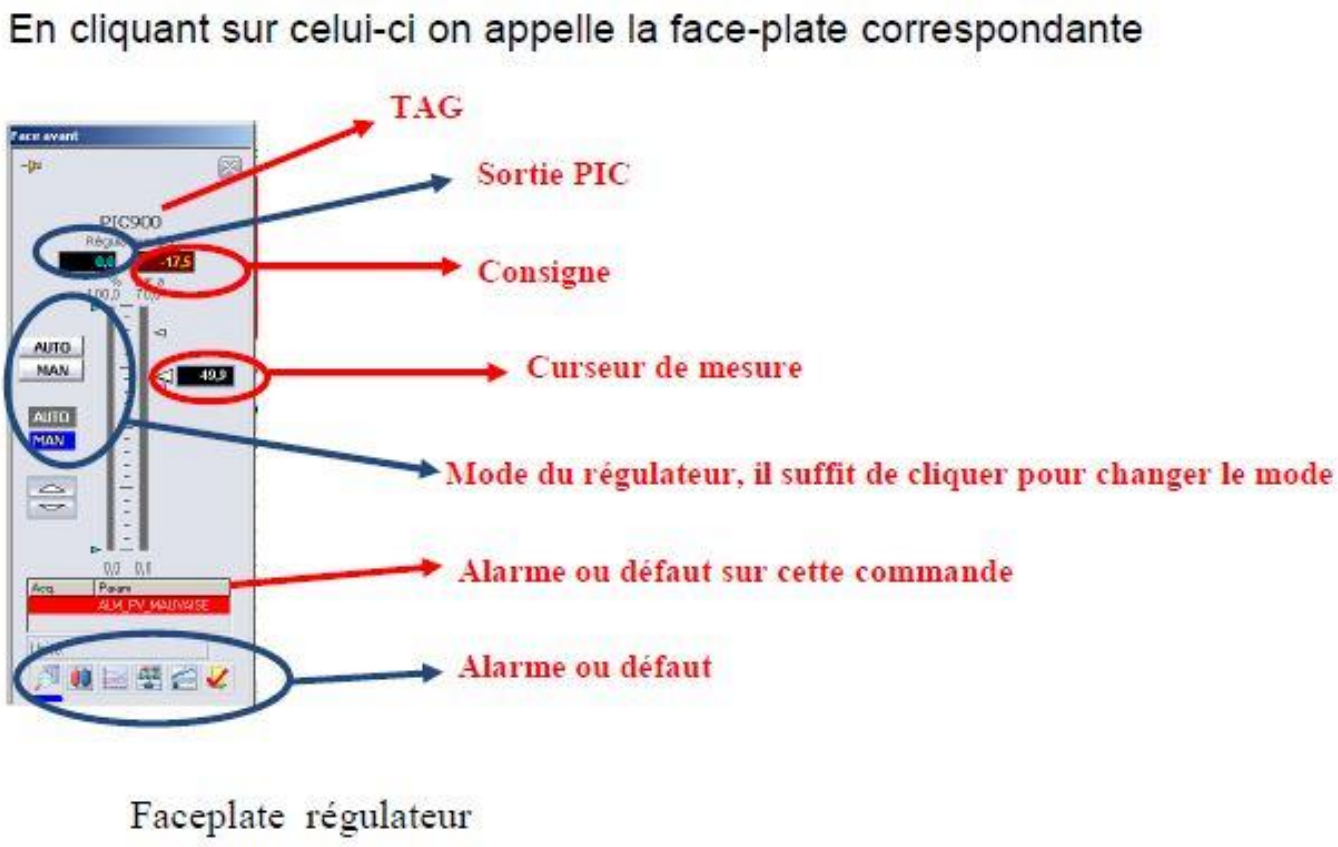


Figure IV.11 Fenêtre de commande générale du système de régulation de pression

IV.6 Présentation de la problématique

IV.6.1 Description du système de pression

Le système de pression de gaz au sein de l'installation industrielle concernée est composé de plusieurs éléments essentiels, notamment des compresseurs, des régulateurs de pression, des vannes de contrôle PCV, des capteurs de pression, et un système de supervision SCADA. Ce système assure la circulation du gaz sous une pression constante afin de garantir un fonctionnement optimal des équipements et d'éviter tout incident technique.

IV.6.2 Principe de fonctionnement de système de régulation

Avant la mise en service du système, il est essentiel de respecter les règles de sécurité établies par le concepteur. Ces règles incluent :

- Dans le système automatique, le taux d'ouverture de la vanne doit être compris entre 34 % et 70 %.
- Le débit de chaque vanne doit être compris entre 340000 Cm^3/h et 504000 Cm^3/h.
- La différence de pression entre la sortie et l'entrée ne doit pas dépasser 6 bars.
- La pression du gaz d'alimentation doit être comprise entre 3,5 bars et 6,5 bars.
- En cas de coupure électrique sur le PCV (Vanne de contrôle de pression), celle-ci doit s'ouvrir à 100 % instantanément pour mesure de sécurité et pour assurer la continuité d'exploitation.
- En cas de violation de la pression d'alimentation en gaz de la PCV, elle ne doit pas répondre.
- En cas d'extinction de l'ordinateur, le système continue à fonctionner normalement en utilisant les dernières données disponibles. [13]

Nous aborderons maintenant les étapes pour mettre en service le système. Pour réguler la pression dans ces vannes, deux méthodes principales sont utilisées.

La première méthode est le contrôle manuel, où la vanne est ajustée manuellement en tournant le volant pour l'ouvrir ou la fermer. Quant à la deuxième méthode, elle repose sur deux approches : le contrôle informatisé et le contrôle électrique. Dans la méthode de contrôle informatisé, des calculs hydrauliques et des équations sont utilisés pour réguler l'ouverture et la fermeture des vannes afin de maintenir la pression requise. Ce type de contrôle comprend deux modes : le contrôle manuel et le contrôle automatique. En ce qui concerne la méthode basée sur le contrôle électrique, un système électrique intégré est utilisé pour réguler l'ouverture et la fermeture des vannes. Les vannes sont connectées à un système électrique et sont précisément contrôlées par l'intermédiaire d'un panneau de commande. Nous allons maintenant expliquer chaque méthode en détail pour une meilleure compréhension. [13]

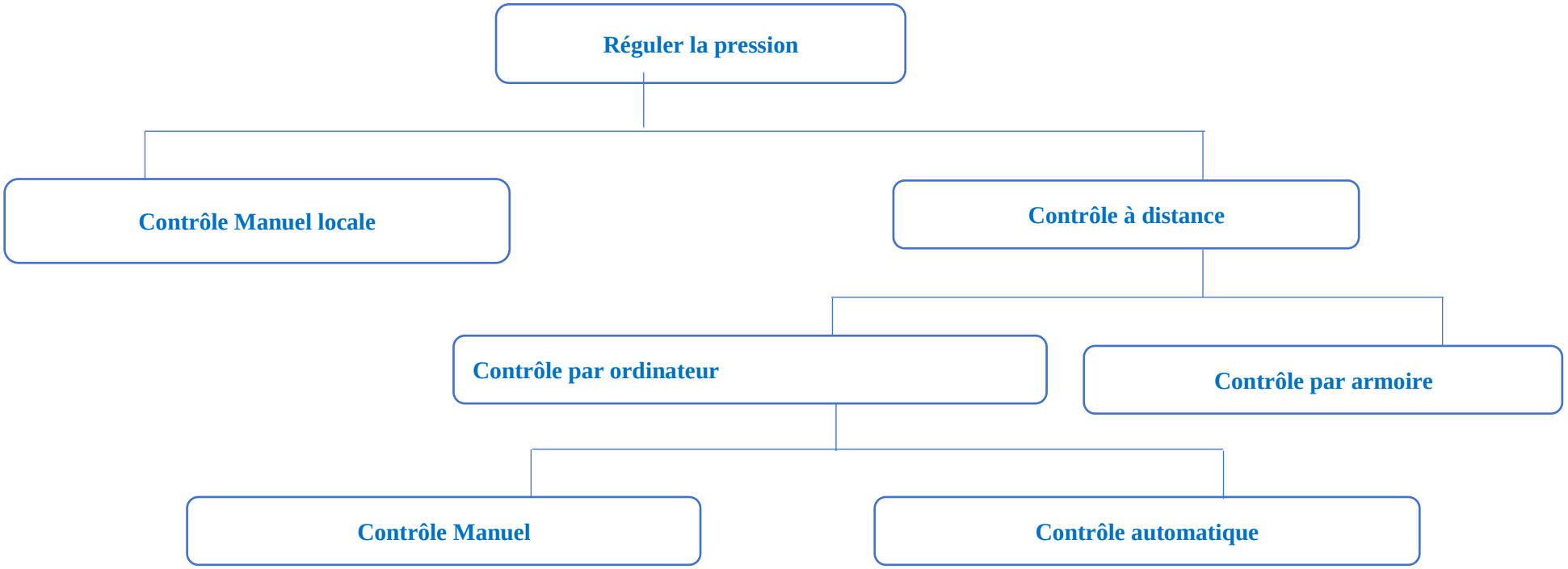


Figure IV.12 Schéma des méthodes de contrôle pour la régulation de la pression

IV.6.2.1 Méthode de contrôle[12]

IV.6.2.1.1 Méthode de contrôle locale via le volant :

Dans cette méthode, il n'est pas nécessaire de s'alimenter au gaz instrument pour contrôler les PCV. Il suffit de libérer le verrouillage et tourner le volant lentement pour éviter tous les perturbations , et à chaque tour, tournez la PCV jusqu'à atteindre la pression désirée

IV.6.2.1.2 Méthode de contrôle à distance :

Dans cette méthode, il y a trois façons de contrôler le système :

a) Méthode de secours en contrôlant le système via l'armoire électrique :

Dans cette méthode, il suffit de fournir le gaz instrument aux PCV et de basculer le commutateur vers le système de secours. L'inconvénient de cette méthode est que vous ne pouvez pas contrôler chaque PCV individuellement, mais vous contrôlez cinq PCV ensemble (GO1, GO2 et GO3). Ensuite, vous pouvez ajuster les boutons de l'armoire électrique jusqu'à atteindre la pression souhaitée.



b) Contrôle du système via un logiciel sur ordinateur (DeltaV) :

Dans cette méthode, vous devez d'abord mettre le commutateur sur "principal". Ensuite, vous avez deux options :

- ✓ Option manuelle : Dans cette option, vous pouvez tourner la vanne à la valeur de pression souhaitée en cliquant avec la souris sur la flèche de la vanne.
- ✓ Option automatique : Dans cette option, vous pouvez entrer la valeur de pression souhaitée et le logiciel ajustera automatiquement la vanne



Figure IV.13 Détaille de la fenêtre de suivi d'une vanne pcv

IV.6.3. Fonctionnement du PID [12]

La figure ci-dessous illustre les variations de la pression de sortie en fonction du temps. Comme vous pouvez le constater, la pression est instable, ce qui a été jugé inacceptable par le client et est incompatible avec une mesure fiable du comptage de gaz.

Le système PID (Proportionnel-Intégral-Dérivatif) est utilisé pour le réglage automatique de la pression dans l'installation. Il agit uniquement sur l'ouverture et la fermeture progressive des vannes PCV afin de maintenir la pression à une valeur de consigne prédéfinie.

Lorsque la pression mesurée dépasse la consigne, par exemple si la consigne est de 50.5 bars et que la pression est de 51 bars, le PID ordonne une fermeture progressive de la vanne PCV. Si la vanne est ouverte à 60 %, il la réduit à 59 % puis attend pour observer l'évolution de la pression.

Cependant, il arrive que la pression ne change pas. Le PID, constatant cela, poursuit les ordres de fermeture jusqu'à atteindre par exemple 55 %. Toutefois, en réalité, la vanne PCV reste bloquée à 60 %, sans exécuter les commandes successives.

De manière subite et imprévisible, la vanne réagit tardivement et se ferme directement à la position 55 %. Cette action provoque une chute brutale de la pression jusqu'à 47 bars.

Ce genre de variation soudaine est extrêmement problématique pour le client, car il perturbe gravement le système de comptage du gaz, entraînant une perte de fiabilité des données.

En raison de ces désagréments, le système de régulation de pression a dû être mis hors service jusqu'à ce que le problème soit résolu.

Ajout complémentaire :

Cette instabilité est clairement visible sur le graphique ci-dessous, qui met en évidence les fluctuations brutales de la pression de sortie. Ces variations traduisent le dysfonctionnement décrit précédemment et confirment que la commande PID ne parvient pas à stabiliser correctement la pression, en raison des blocages intermittents des vannes PCV.

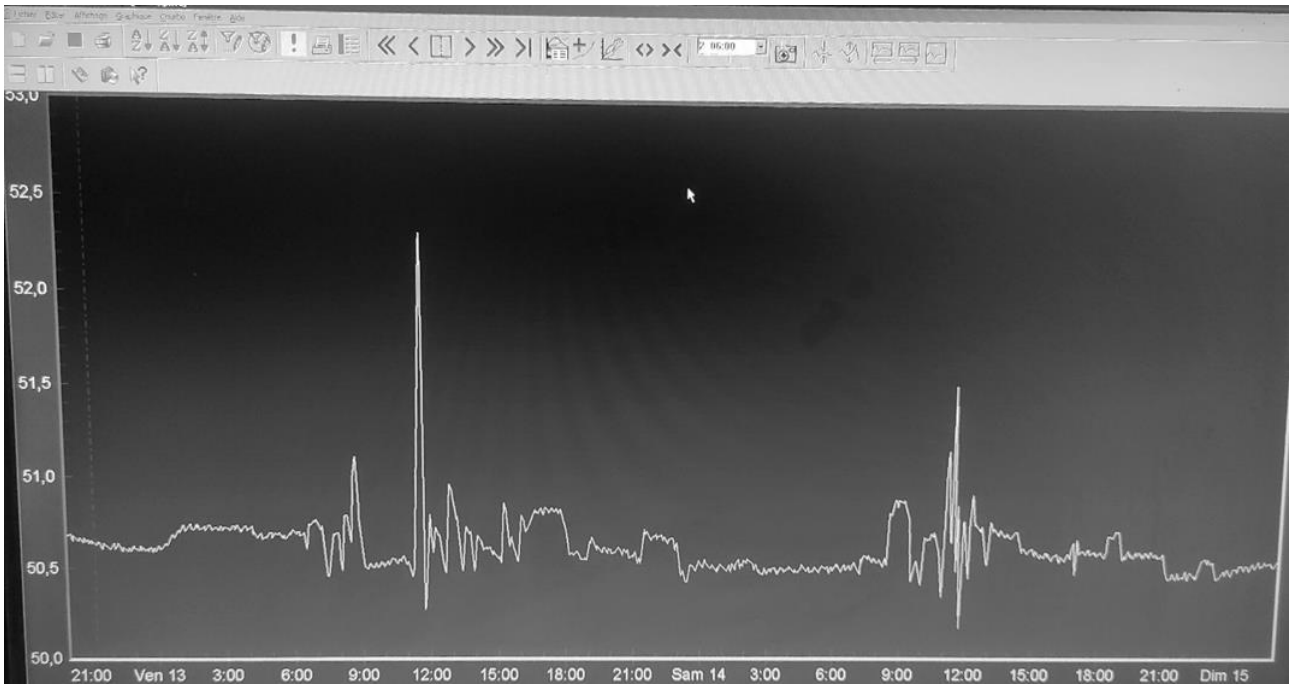


Figure IV.14 Variation de la pression de sortie en fonction du temps

IV.6.4. Identification du dysfonctionnement [13]

Malgré la mise en place du système PID, des instabilités de pression ont été observées dans certaines sections de l'installation. Ces fluctuations se traduisent par des variations brusques de la pression, pouvant entraîner des arrêts d'urgence des équipements ou une réduction du débit de gaz. L'analyse préliminaire a révélé que ces instabilités sont principalement dues à des défaillances au niveau des vannes de contrôle PCV (Problème Mécanique), qui présentent parfois des réponses lentes ou des blocages partiels, retardant l'exécution des ordres du PID.

Sur l'image ci-dessous, vous pouvez observer une différence entre la consigne envoyée par le PID (40 %) et la position réelle de la vanne, bloquée à 37.5 %. Ce type d'écart n'est pas pris en compte par le système actuel, ce qui contribue aux problèmes d'instabilité de pression.

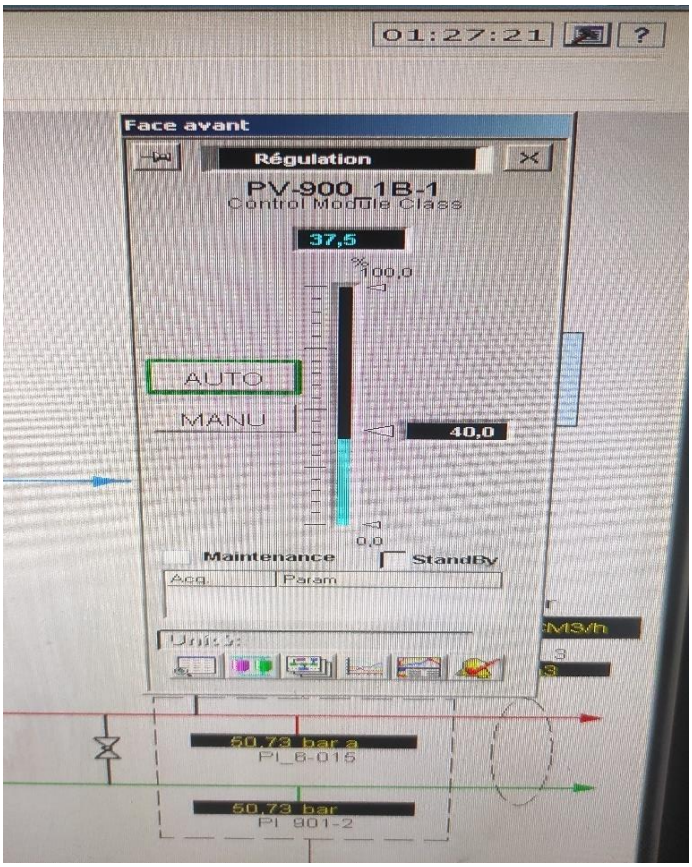


Figure IV.15 Écart entre la consigne PID et la position réelle d'une vanne PCV

IV.6.4.1. Conséquences techniques et économiques

Comme vous pouvez l'observer sur la figure ci-dessous, qui représente le débit instantané de gaz en fonction du temps sous l'effet des vannes PCV, on constate une forte instabilité. Le débit ne se stabilise jamais, ce qui est un phénomène inacceptable pour le comptage du gaz.

En effet, le système de comptage repose sur le principe de l'orifice, une technique de mesure qui exige un écoulement laminaire et stable du gaz afin d'assurer une précision optimale. Ces fluctuations perturbent donc le comptage et nous ont contraints à mettre le système de régulation hors service jusqu'à ce qu'une solution alternative soit trouvée.

Les instabilités de pression engendrent plusieurs conséquences négatives sur l'exploitation de l'installation :

- Usure prématurée des équipements due aux variations constantes de pression.
- Augmentation des interventions de maintenance pour réparer les composants défectueux.
- Risque accru d'arrêts de production impactant directement la livraison de gaz aux clients.
- Perturbations dans le système de comptage du gaz, provoquant des erreurs de mesure.
- Pertes énergétiques dues aux ajustements fréquents des vannes et des compresseurs.

Ces problèmes se traduisent par des coûts supplémentaires importants et affectent la rentabilité globale de l'exploitation. D'où la nécessité de trouver une solution pour stabiliser la pression et améliorer la fiabilité du système.

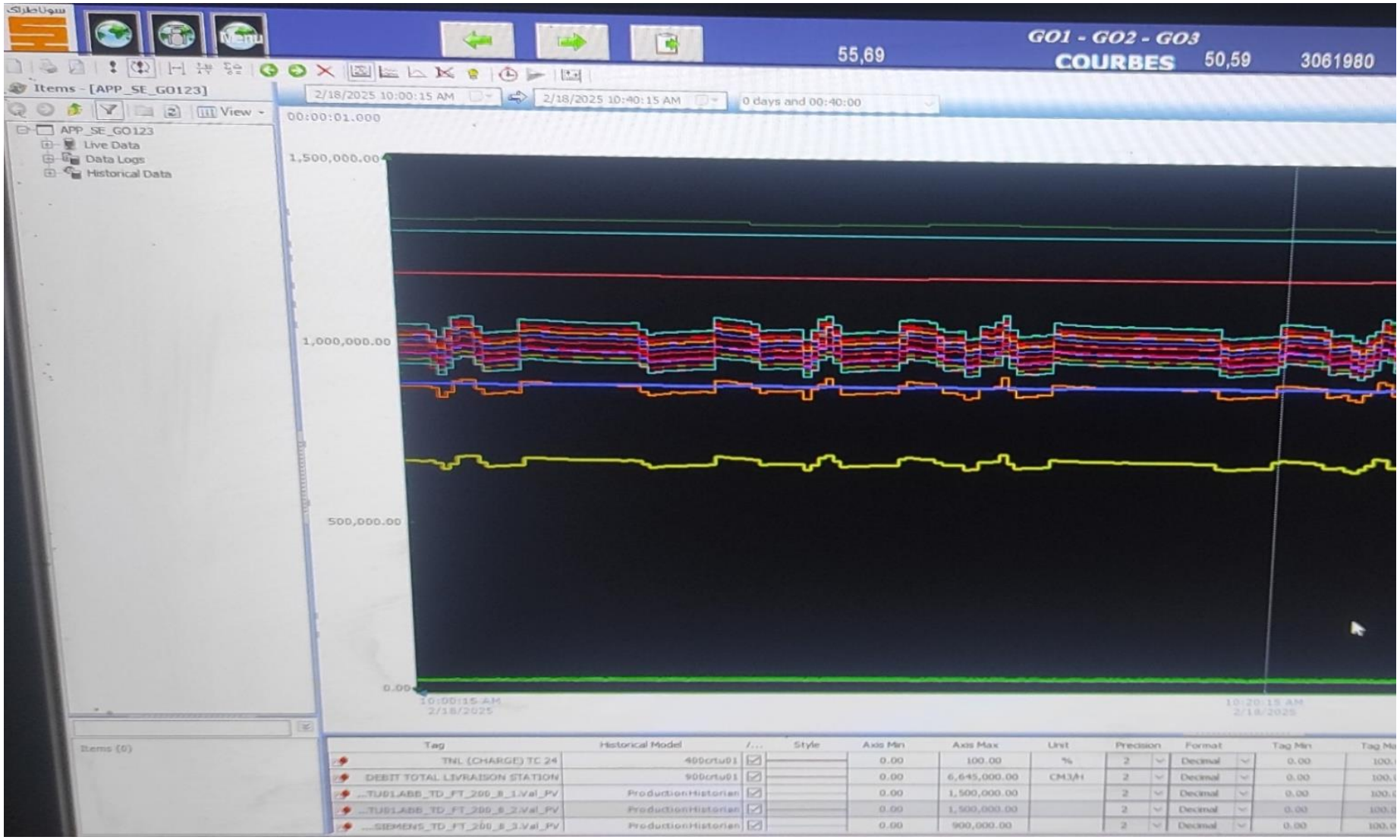


Figure IV.16 Instabilité du débit de gaz en fonction du temps sous l'effet des vannes PCV

IV.7. Conclusion

À travers ce chapitre, nous avons présenté de manière détaillée le système de régulation de pression mis en place sur le site d'étude. Après avoir rappelé les principes fondamentaux de l'hydraulique des canalisations de fluides, nous avons décrit l'architecture générale du système, ses composants essentiels, ainsi que son mode de fonctionnement. Cette analyse a permis de mieux cerner les spécificités techniques et opérationnelles du dispositif.

La dernière section a mis en lumière la problématique rencontrée, qui résulte d'un dysfonctionnement ou d'une inefficacité partielle du système de régulation, impactant la stabilité des pressions et la performance globale du réseau. Cette problématique constitue le point de départ de notre réflexion et guidera les travaux de diagnostic, de modélisation et de proposition d'améliorations présentés dans le chapitre suivant.

Chapitre V

Proposition Et Mise En Place D'une Solution Alternative

V.1. Introduction

Suite aux dysfonctionnements récurrents constatés sur les vannes PCV (Pneumatic Control Valves) et à l'instabilité de la pression qu'ils entraînent au sein du système, il est devenu nécessaire de revoir la configuration actuelle afin d'assurer un fonctionnement plus fiable et sécurisé de l'installation. Ces anomalies, qui peuvent compromettre la performance globale et la sécurité opérationnelle, exigent la mise en place d'une solution technique alternative, capable de stabiliser la pression de manière durable tout en garantissant une régulation efficace et précise. Cette section présente l'analyse des causes possibles des défaillances, les critères de choix de la solution de remplacement, ainsi que les étapes de sa mise en œuvre.

V.2. Élaboration et Implémentation d'une Solution Alternative pour laStabilisation de la Pression [14]

V.2.1. Analyse des besoins

Suite aux dysfonctionnements rencontrés sur les vannes PCV et à l'instabilité de la pression, il est apparu nécessaire de mettre en place une solution alternative garantissant une meilleure réactivité et une stabilité accrue du système. Les objectifs principaux sont les suivants :

- Assurer un contrôle précis et fiable de l'ouverture et de la fermeture des vannes PCV.

- Éviter les variations brusques de pression, source de perturbations pour le système de comptage de gaz.

- Supprimer la dépendance au PID, dont le fonctionnement était perturbé par le défaut de réactivité des actionneurs.

- Préserver la fiabilité des données issues du comptage de gaz.

V.2.2. Conception de la solution alternative

La solution retenue repose sur l'élaboration d'un nouveau code de régulation de la pression, totalement indépendant du PID. Ce code a été conçu et intégré au système de régulation de pression, qui est distinct du système SCADA. La conception s'est appuyée sur les éléments suivants :

- Exploitation des capteurs de position déjà installés sur les vannes PCV pour connaître en temps réel leur position réelle.

- Remplacement de la logique PID par une logique de contrôle personnalisée, permettant une prise en compte directe de la position réelle de la vanne avant d'envoyer de nouveaux ordres.

- Écriture d'un programme spécifique qui ajuste progressivement l'ouverture ou la fermeture de la PCV tout en vérifiant immédiatement la réponse de la vanne, afin d'éviter les écarts soudains de pression.

- Mise en place d'un mécanisme de surveillance continue qui arrête toute action corrective en cas de blocage suspect de la vanne.

V.2.3. Implémentation de la solution

La mise en place de cette solution a suivi les étapes suivantes :

- Écriture du nouveau code de régulation de pression, distinct du PID et du système SCADA.

- Test du code sur le système de régulation de pression afin de valider son bon fonctionnement en conditions réelles.

- Intégration des données de position des vannes dans le programme afin d'assurer une concordance continue entre les ordres envoyés et les réponses des actionneurs.

- Validation sur le terrain avec les équipes d'exploitation pour garantir l'efficacité et la fiabilité de la solution. [14]

V.3. Présentation détaillée du code

Ce chapitre présente en détail le code alternatif développé pour remplacer le régulateur PID, accompagné d'une explication approfondie du diagramme fonctionnel ci-dessous illustrant le fonctionnement de ce code. Cette explication est nécessaire afin de mieux comprendre les défis liés à l'exploitation du gaz et la nécessité des conditions spécifiques introduites dans le programme.

V.3.1. Défi majeur dans l'exploitation

L'un des plus grands défis rencontrés lors de l'exploitation du gaz réside dans la proximité d'une station de compression située à seulement 1 km de la station terminale faisant l'objet de cette étude. Cette situation engendre deux risques majeurs :

- En cas d'arrêt des turbines du client, le débit instantané chute brusquement à zéro, ce qui provoque une montée rapide de la pression (retour). Cela peut entraîner l'ouverture des soupapes de sécurité, occasionnant ainsi des pertes importantes de gaz et un impact environnemental significatif.

- D'un autre côté, si le système de régulation de gaz provoque une instabilité de la pression, cela peut également perturber l'installation du client.

Par conséquent, deux mesures principales ont été intégrées au code :

- En cas d'arrêt des turbines du client, le système de régulation de gaz s'ouvre automatiquement (à 100%) pour éviter une montée excessive de la pression.

- En cas d'instabilité de la pression, le système est temporairement arrêté pour éviter de perturber l'installation du client.

V.3.2. Description détaillée du diagramme fonctionnel

Le diagramme en annexe illustre les étapes et les conditions du fonctionnement du code alternatif :

1. Le processus commence avec le **PIC900**, qui est responsable de l'ajustement de l'ouverture et de la fermeture des vannes.

2. La première condition vérifie si la pression est supérieure à 57.5 bars. Si c'est le cas, le système ouvre toutes les vannes immédiatement pour éviter une montée excessive de la pression (situation potentiellement causée par l'arrêt des turbines du client).

3. Si la pression est dans une plage acceptable, le système vérifie s'il est en mode manuel ou automatique :

- En mode manuel : le système n'agit pas et attend les ordres manuels.

- En mode automatique : le système poursuit son fonctionnement.

4. Le système vérifie ensuite si la pression est instable en comparant la valeur actuelle de pression avec la valeur enregistrée 10 secondes plus tôt. Le seuil d'instabilité est défini manuellement par l'opérateur.

- Si la pression est instable, le système s'arrête pendant une durée déterminée (également configurable).

- Si la pression est stable, le système continue.

5. Ensuite, le système détermine si le client est en arrêt en surveillant les variations de pression sur 10 secondes :

- Si les variations sont faibles, cela indique que le client est en fonctionnement normal.

- Si les variations sont croissantes et continues, cela indique un arrêt du client.

6. En cas d'arrêt du client, le système s'arrête tant que la pression n'est pas redescendue à 54 bars. Il est également nécessaire que la différence entre la pression d'entrée et la pression de sortie soit supérieure à 1 bar pour ouvrir toutes les vannes.

7. Si le client est en fonctionnement normal, le système vérifie si la pression est égale à la consigne :

- Si la pression est égale à la consigne, le système s'arrête.

- Si elle est supérieure ou inférieure à la consigne, le système ajuste l'ouverture des vannes.

8. Un mécanisme de correction est intégré :

- Le système compare la valeur d'ouverture envoyée avec la valeur réelle mesurée. Si l'écart est inférieur à 0.18 (valeur configurable), le système continue.

- Si l'écart est supérieur, le système s'arrête et attend que l'ouverture réelle atteigne la valeur envoyée.

- Si, après un certain temps, la valeur réelle n'atteint toujours pas la valeur envoyée, le système augmente progressivement l'ouverture de 0.01 toutes les 5 minutes. Cette augmentation s'arrête lorsque l'écart atteint 0.35.

Ce mécanisme d'auto-ajustement garantit que le système fonctionne de manière fluide sans provoquer de perturbations importantes sur la pression.

Ce code a permis d'assurer une meilleure stabilité de la pression et d'éviter les pertes de gaz, tout en maintenant une exploitation sécurisée et fiable, adaptée aux particularités du site étudié.

Enfin, en dessous du diagramme, vous trouverez également une image représentant la fenêtre que l'opérateur utilise pour saisir les paramètres du système. Les données que l'opérateur peut entrer dans cette fenêtre sont les suivantes, dans l'ordre :

- ✓ Pas d'évolution de pourcentage minimum
- ✓ Durée de changement du pas
- ✓ Différence de pression acceptable entre la pression de sortie et la consigne
- ✓ Durée de pause d'évolution de pourcentage en cas de perturbation
- ✓ Différence de pourcentage acceptable entre la valeur réelle et la valeur envoyée

V.3.3. Explication détaillée de chaque paramètre

1. Pas d'évolution de pourcentage minimum

Ce paramètre représente la plus petite variation autorisée dans l'ouverture des vannes de régulation.

- Rôle : Lorsqu'une commande est envoyée pour ajuster l'ouverture des vannes, le système ne modifiera pas cette ouverture de manière inférieure à cette valeur minimale. Cela évite que les vannes effectuent de très petits mouvements incessants, ce qui pourrait provoquer une usure mécanique et une instabilité de la pression.

- Exemple : Si ce pas est réglé à 0,01 %, cela signifie que chaque fois que le système veut ajuster l'ouverture, il le fera par pas de 0,01 % au minimum.

2. Durée de changement du pas

Ce paramètre définit l'intervalle de temps entre deux ajustements successifs de l'ouverture des vannes.

- Rôle : Il détermine la fréquence à laquelle le système peut appliquer le "pas d'évolution" pour ajuster l'ouverture des vannes. Cela permet de lisser les variations et d'éviter des changements trop brusques qui pourraient provoquer des instabilités de pression.

- Exemple : Si cette durée est réglée à 10 secondes, cela signifie que le système ajustera l'ouverture des vannes toutes les 10 secondes selon le pas défini.

3. Différence de pression acceptable entre la pression de sortie et la consigne

Ce paramètre fixe l'écart maximal acceptable entre la pression de sortie (pression de livraison) et la consigne de pression définie par l'opérateur.

- Rôle : Il permet de s'assurer que la pression de livraison se rapproche autant que possible de la valeur de consigne. Si l'écart entre la pression mesurée et la consigne est inférieur à cette valeur, le système considère que l'objectif est atteint et cesse les ajustements. Si l'écart est supérieur, le système continue d'ajuster l'ouverture des vannes jusqu'à atteindre la consigne.

- Exemple : Si cette différence est réglée à 0,1 bar, cela signifie que si la consigne est de 50 bar et que la pression de livraison est de 50,1 bar, le système considère que l'objectif est atteint et arrête les ajustements. En revanche, si l'écart est supérieur à 0,1 bar, le système continuera d'ajuster les vannes pour se rapprocher de la consigne.

4. Durée de pause d'évolution de pourcentage en cas de perturbation

Ce paramètre détermine la durée pendant laquelle le système suspendra toute modification de l'ouverture des vannes si une perturbation est détectée.

- Rôle : En cas d'instabilité ou de variations rapides et anormales de la pression, ce temps d'arrêt permet d'attendre que le système se stabilise avant de reprendre les ajustements.

- Exemple : Si la durée est réglée à 5 min, cela signifie qu'en cas de détection d'une perturbation (fortes fluctuations de pression), le système cessera temporairement d'ajuster l'ouverture des vannes pendant 5 min, le temps que la situation se calme.

5. Différence de pourcentage acceptable entre la valeur réelle et la valeur envoyée

Ce paramètre définit l'écart maximal toléré entre l'ouverture des vannes demandée par le système et l'ouverture réelle constatée sur le terrain.

- Rôle : Il permet de s'assurer que la commande envoyée est effectivement suivie d'une action correcte sur le terrain. Si l'écart est trop important, cela signifie que les vannes peuvent être bloquées ou lentes à réagir, ce qui peut nécessiter une intervention humaine.

- Exemple : Si cette différence est réglée à 0,2 %, cela signifie que si le système demande une ouverture à 50 %, mais que la valeur réelle mesurée est 49,7 % ou 50,3 %, cela est considéré comme acceptable. En revanche, si l'écart est supérieur à 0,2 %, le système considérera qu'il y a un problème et pourra stopper ou adapter son action.

Ces paramètres permettent à l'opérateur d'adapter le comportement du système de régulation en fonction des contraintes spécifiques du site et des exigences d'exploitation. Une mauvaise configuration pourrait conduire soit à une instabilité de pression, soit à une lenteur excessive de la réaction du système, pouvant entraîner des ouvertures des soupapes de sécurité ou une interruption de l'exportation du gaz.

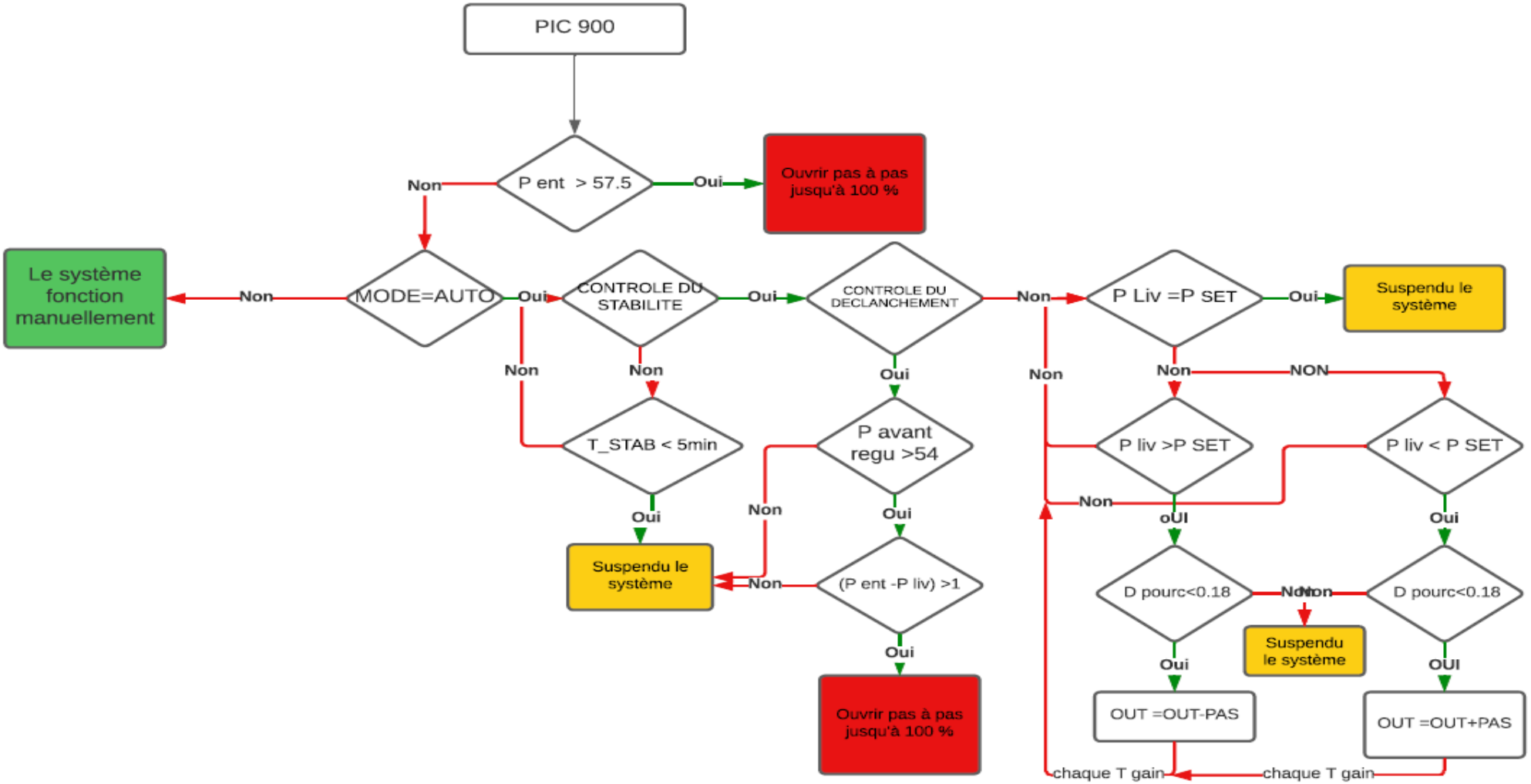


Figure V.1 Grafcet PIC900

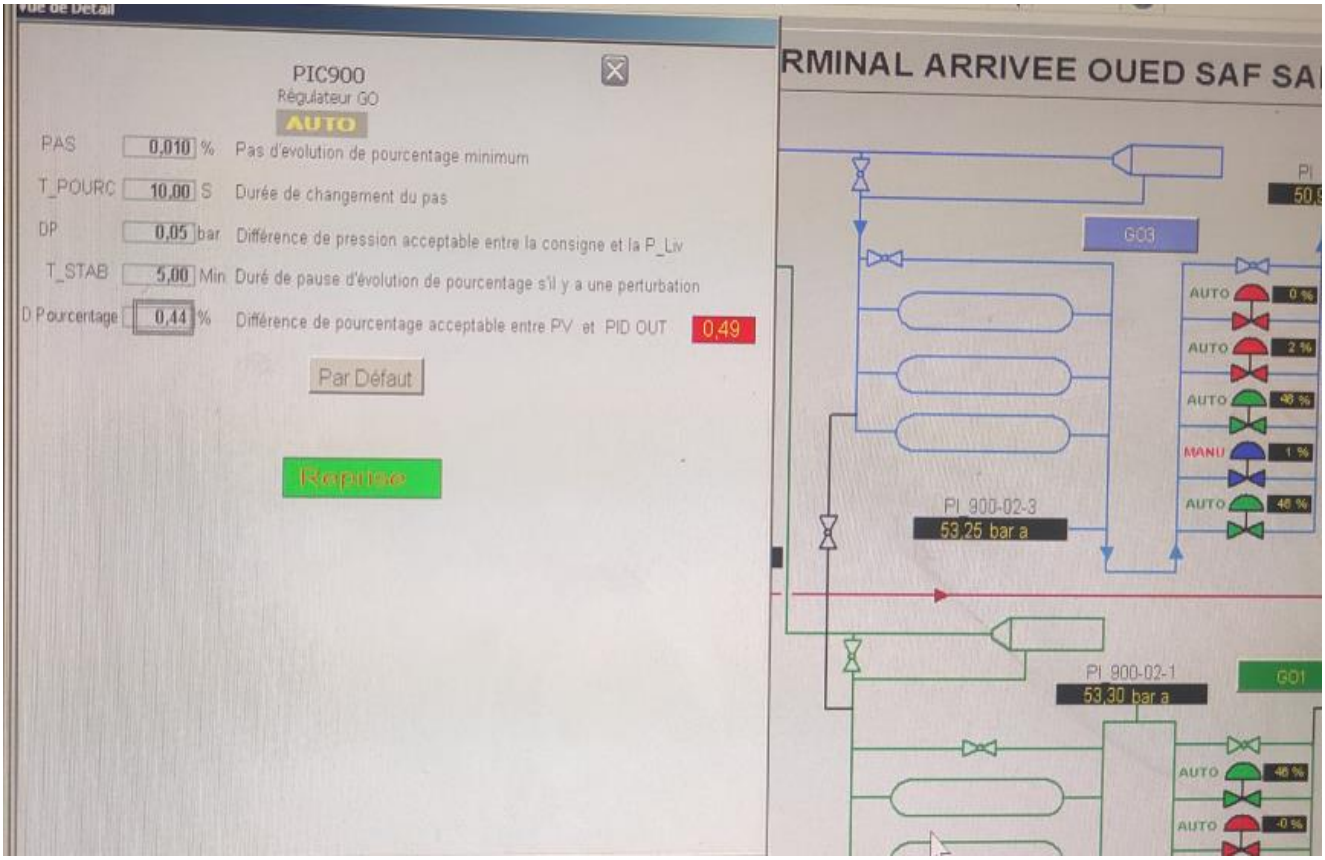


Figure V.2 Fenêtre de Configuration des Paramètres de Régulation de Pression

V.3.4. Avantages attendus après le remplacement du PID

Le remplacement du régulateur PID classique par une solution alternative adaptée aux besoins spécifiques du site industriel étudié présente plusieurs avantages significatifs. Ces avantages se traduisent à la fois sur le plan opérationnel, économique et en matière de sécurité :

V.3.4.1 Amélioration de la stabilité de la pression

- Grâce à une meilleure adaptation aux conditions réelles du terrain, le nouveau système permettra de réduire les fluctuations excessives de la pression de livraison. Cela garantira une pression plus constante, limitant ainsi les risques d'activation des soupapes de sécurité et les interruptions d'exportation.

1

2

V.3.4.2. Réduction des interventions humaines

- Le système optimisé nécessitera moins d'ajustements manuels de la part des opérateurs. Une automatisation plus fine et une prise en compte des perturbations spécifiques permettront de diminuer le besoin d'interventions correctives fréquentes.

V.3.4.3. Réduction de l'usure mécanique des vannes

- En évitant les micro-ajustements incessants et en introduisant des paramètres comme le pas minimum d'évolution et la durée de pause en cas de perturbation, le nouveau système prolongera la durée de vie des équipements de régulation.

V.3.4.4.Réactivité accrue en cas de perturbations

- Le système alternatif pourra intégrer des délais de réaction et des seuils de tolérance personnalisés, permettant une meilleure gestion des écarts de pression et une adaptation rapide aux variations soudaines.

V.3.4.5. Optimisation des coûts d'exploitation

- La diminution des arrêts intempestifs et la réduction de l'usure des composants entraîneront des économies sur les coûts de maintenance et de remplacement. Une meilleure stabilité de pression permettra également d'éviter les pertes de gaz dues aux déclenchements de soupapes de sécurité.

V.3.4.6. Sécurisation de la chaîne d'approvisionnement

- Une régulation plus fiable garantit que les clients reçoivent le gaz à une pression conforme aux engagements contractuels. Cela limite les risques de litiges et d'interruptions de service.

V.3.4.7. Flexibilité et adaptation au site

- Contrairement au PID standard qui fonctionne selon des lois génériques, le système développé pourra être ajusté précisément en fonction des contraintes et particularités du réseau de gaz de l'installation étudiée.

En résumé, la mise en place d'une solution alternative au PID permettrait d'assurer une meilleure maîtrise des variations de pression, de diminuer les coûts de maintenance, et d'améliorer à la fois la

sécurité et la qualité de la fourniture de gaz. Ces bénéfices justifient pleinement l'étude approfondie et le développement d'une approche sur mesure adaptée aux besoins de l'entreprise.

V.4. Analyse comparative et résultats

V.4.1. Comparaison des performances PID vs Programme alternatif

Dans cette section, nous procédons à une comparaison détaillée des performances du régulateur PID classique avec celles du programme alternatif développé dans le cadre de cette étude. L'objectif est d'évaluer dans quelle mesure le programme proposé améliore le comportement du système de régulation de pression par rapport au PID.

Pour mener cette comparaison, plusieurs critères de performance ont été retenus :

- ✓ Stabilité de la pression : Évaluation de la capacité du système à maintenir la pression de livraison proche de la consigne, en minimisant les écarts et les oscillations.
- ✓ Réactivité aux perturbations : Analyse de la rapidité avec laquelle le système corrige les écarts de pression en cas de perturbations sur le réseau (par exemple, variations soudaines de débit).
- ✓ Réduction des fluctuations : Observation des variations de l'ouverture des vannes. L'objectif est de limiter les ajustements trop fréquents ou excessifs, afin d'assurer une régulation plus douce et stable.
- ✓ Fiabilité des vannes : Vérification que le programme alternatif réduit l'usure mécanique des vannes en diminuant les micro-ajustements incessants.
- ✓ Minimisation des déclenchements de soupapes de sécurité : Examen des cas où les soupapes de sécurité sont sollicitées. Une régulation instable ou trop lente peut entraîner une surpression, déclenchant ces dispositifs de sécurité.
- ✓ Optimisation des cycles de régulation : Analyse des cycles de commande sur les vannes pour s'assurer que le programme alternatif apporte une meilleure fluidité dans les changements d'ouverture.
- ✓ Ces critères permettront d'établir une évaluation globale de l'efficacité de la solution proposée et de déterminer si elle constitue une amélioration notable par rapport au PID classique dans le contexte industriel étudié.

V.4.2. Évaluation de la stabilité de la pression

L'évaluation de la stabilité de la pression est une étape essentielle pour analyser le comportement du système de régulation et mesurer son efficacité à maintenir une pression de sortie conforme à la consigne définie. L'objectif de cette expérimentation était d'observer la réponse du système face à une modification de la consigne et d'identifier les éventuelles instabilités pouvant survenir lors de l'ajustement de la pression.

V.5.Analyse et Explication du Comportement du Système de Régulation de Pression

Comme nous pouvons l'observer sur le graphique du bas, plusieurs courbes sont représentées

- La courbe en jaune représente la consigne de pression (consigne).
- La courbe en blanc indique le taux d'ouverture des vannes de régulation.
- La courbe en vert correspond à la pression d'entrée.
- La courbe en bleu représente la pression de sortie.

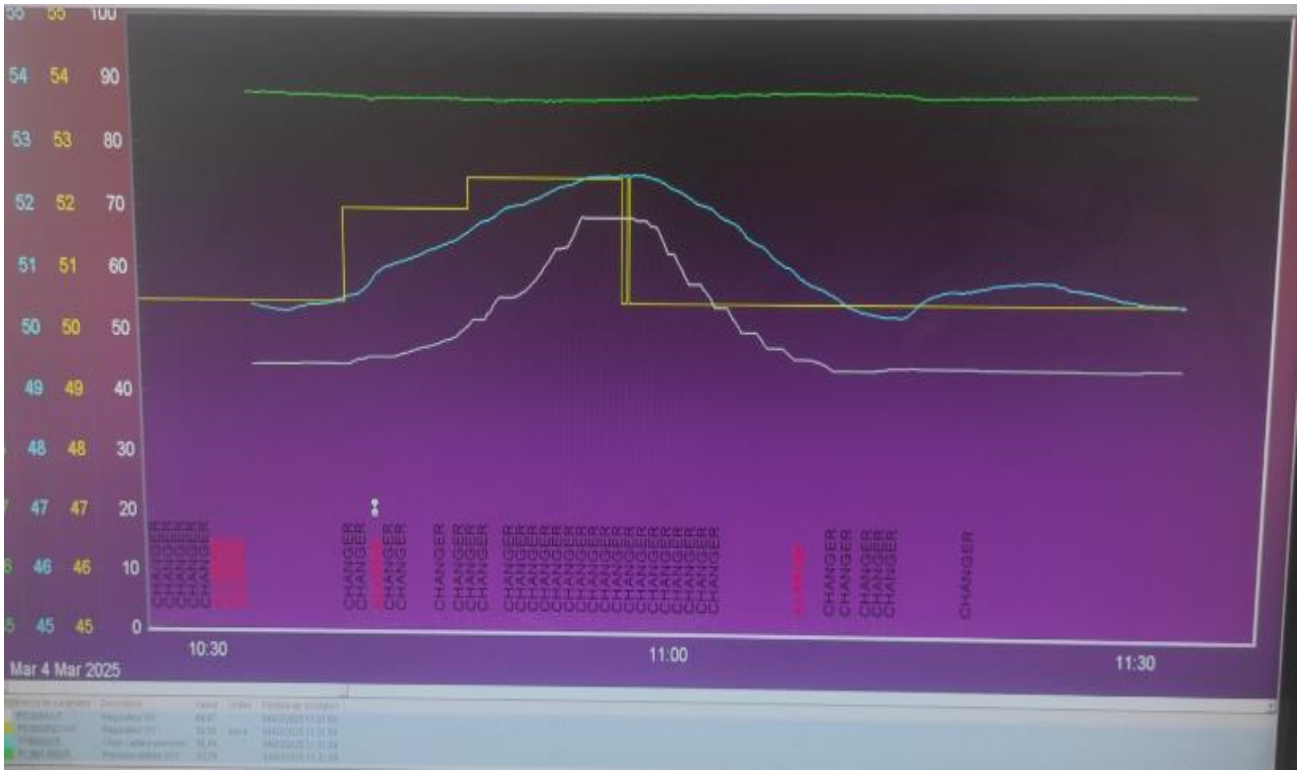


Figure V.3 Courbes représentent le comportement du système de régulation

Avant le début de l'expérience, le système fonctionnait de manière stable, c'est-à-dire que la pression de sortie était égale à la consigne. L'objectif de cette expérience était de modifier la consigne en la portant à 52,5 bars afin d'évaluer la réaction du nouveau programme et d'analyser son comportement en conditions réelles.

V.5.1. Une Expérience Complexe Nécessitant des Autorisations

Il est important de souligner que cette expérience n'a pas été réalisée sans précaution, car toute modification de la consigne de pression impacte directement la chaîne de transport du gaz, ce qui pourrait entraîner des perturbations importantes dans le fonctionnement global du réseau.

Pour cette raison, nous avons dû obtenir l'autorisation du responsable de l'entreprise ainsi que celle du client avant d'effectuer cette modification. Étant donné les risques potentiels, une seule expérimentation a été réalisée afin de limiter les perturbations et d'assurer une surveillance continue du processus.

V.5.2. Explication du Comportement Observé

Lorsque la consigne a été modifiée à 52,5 bars, le système a réagi en ouvrant progressivement les vannes de régulation pour permettre une augmentation graduellede la pression de sortie. Cette montée progressive est clairement visible sur le graphique, où la courbe bleue (pression de sortie) suit une tendance ascendante.

Cependant, nous pouvons également observer que l'ouverture des vannes ne s'est pas faite de manière linéaire :

- À certains moments, l'ouverture des vannes s'est arrêtée temporairement, bien quela pression de sortie n'ait pas encore atteint la consigne.

- Cette interruption est due à un écart trop important entre l'ouverture réelle des vannes et l'ouverture calculée par le système.

- Dès que cet écart dépasse un certain seuil, le système se met en pause pour éviter une instabilité excessive.

Cette situation est illustrée dans la **figure V.4,** où nous pouvons voir une alerte en rouge indiquant que l'écart a dépassé la limite autorisée, provoquant ainsi l'arrêt temporaire du système.

Lorsque l'écart redevient acceptable, le système reprend son fonctionnement normal, mais il peut également s'arrêter en cas de perturbation du flux de gaz, comme on peut le voir sur la **(figure V.5)**

Dans la**(Figure V.5)**, bien que l'écart (en vert) soit dans la limite acceptable, le système est toujours à l'arrêt en raison d'un temps d'attente obligatoire (indiqué en rouge). Ce délai est un paramètre de sécurité permettant d'éviter des fluctuations excessives dans la pression.

Après cette période d'attente, le système redémarre automatiquement et ajuste la pression de sortie jusqu'à atteindre la consigne. Une fois cet objectif atteint, nous constatons que la pression de sortie devient stable, ce qui signifie que le système fonctionne correctement.

V.5.3.Effet du Changement de Consigne et Influence de la Pression d'Entrée

Lorsque nous avons abaissé la consigne à 50,5 bars, le système a réagi en réduisant progressivement l'ouverture des vannes, appliquant ainsi le même principe que lors de l'augmentation de pression.

De plus, des interruptions similaires peuvent survenir :

- En cas de perturbation dans le débit du gaz, le système suspend temporairement son ajustement.

- Si l'écart entre l'ouverture réelle des vannes et l'ouverture commandée est trop grand, une pause est également déclenchée.

Il est important de noter que ces paramètres peuvent être ajustés par l'opérateur en fonction des conditions de fonctionnement.

V.5.4.Influence de la Pression d'Entrée sur le Comportement du Système

Les seuils de tolérance du système varient en fonction de la pression d'entrée :

- Lorsque la pression d'entrée est élevée, le système adopte des paramètres plus stricts :

- L'écart maximal autorisé est réduit (0,12 bar seulement).

- Le temps d'attente en cas de perturbation est long (10 minutes).

- En revanche, lorsque la pression d'entrée est comprise entre 51 et 53,5 bars, le système devient plus tolérant :

- L'écart autorisé peut atteindre 0,5 bar.

- Le temps d'attente en cas de perturbation est réduit à 1 minute.

V.5.5. Conclusion

L'analyse des résultats montre que, malgré certaines interruptions temporaires, le système de régulation a bien atteint son objectif, en ajustant progressivement la pression de sortie jusqu'à ce qu'elle soit égale à la consigne.

Cela confirme que le programme fonctionne correctement, en respectant les règles de régulation définies et en garantissant un contrôle précis et sécurisé du processus de transport du gaz.

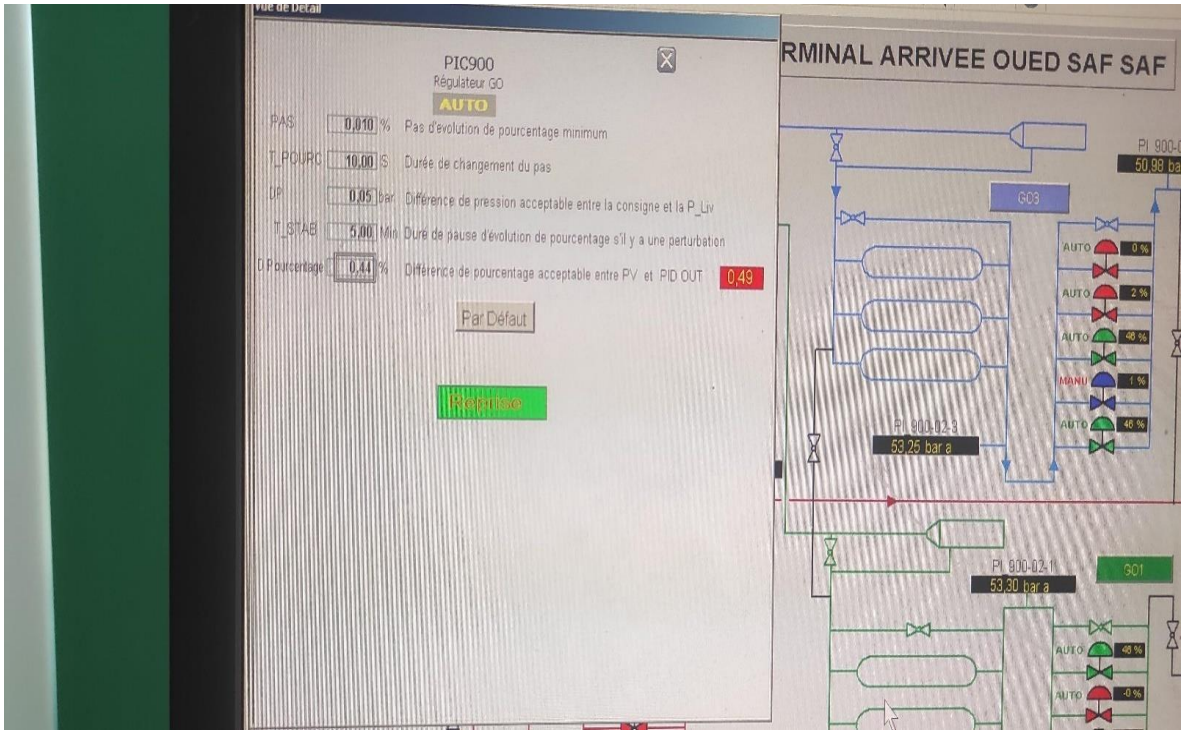


Figure V.4 Système en pause pour éviter l'instabilité excessive

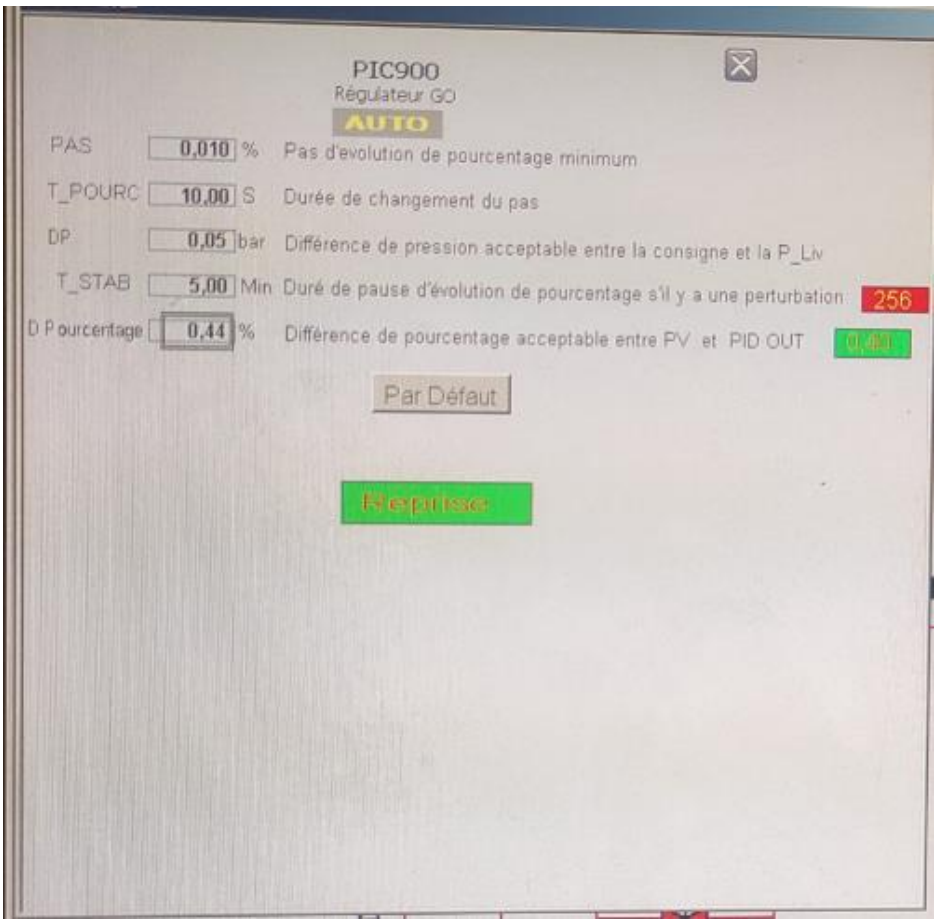


Figure V.5 Système en fonctionne normale avec prudence

V.6. Analyse économique de la solution proposée

L'optimisation d'un système de régulation de pression ne se limite pas à des considérations techniques, mais doit également être évaluée sous l'angle économique. L'implémentation de la nouvelle solution de régulation vise non seulement à améliorer la stabilité du système, mais aussi à réduire les coûts d'exploitation et à optimiser l'efficacité énergétique. Cette analyse économique repose sur plusieurs critères clés, notamment les gains en efficacité, la réduction des pertes de gaz, la diminution des interventions de maintenance et l'amélioration de la fiabilité du réseau de transport.

V.6.1. Réduction des pertes de gaz et optimisation de la consommation énergétique

L'un des principaux défis dans la gestion des réseaux de transport de gaz est la minimisation des pertes dues aux variations de pression. Avant l'implémentation de la nouvelle régulation, des fluctuations excessives de pression entraînaient une consommation énergétique plus élevée et une perte de gaz lors des ajustements brusques.

- **Grâce à la nouvelle solution :**
  - Les ouvertures et fermetures des vannes sont mieux contrôlées, réduisant ainsi les pertes de gaz.
  - Les cycles de régulation sont optimisés, limitant les variations soudaines qui nécessitent une compensation énergétique supplémentaire.
  - L'efficacité des équipements est améliorée, ce qui permet une consommation plus rationnelle de l'énergie utilisée pour maintenir la pression dans les conduites.

Les simulations réalisées montrent une diminution des pertes de gaz de l'ordre de 5 à 10 %, selon les conditions d'exploitation et les pressions appliquées. Cette réduction représente une économie significative à long terme, particulièrement pour les grandes infrastructures de transport de gaz.

V.6.2. Réduction des coûts de maintenance et amélioration de la durée de vie des équipements

Un système de régulation mal optimisé impose une sollicitation excessive des vannes de régulation et des équipements de contrôle, augmentant ainsi leur usure et nécessitant des interventions fréquentes de maintenance.

Avec la nouvelle régulation :

1. Le nombre de manœuvres des vannes est réduit, diminuant ainsi leur usure prématurée.
2. Les risques de surcharge des compresseurs sont limités, prolongeant leur durée de vie.
3. Les interventions de maintenance sont espacées, réduisant ainsi les coûts liés aux réparations et aux remplacements de composants.

Les premières observations indiquent une réduction de 20 à 30 % des interventions de maintenance, ce qui permet de réallouer ces ressources à d'autres tâches stratégiques au sein de l'entreprise.

V.6.3. Impact sur la continuité du service et la satisfaction des clients

Un autre avantage économique non négligeable est l'amélioration de la fiabilité du service. Les interruptions dues aux instabilités de pression peuvent entraîner des pénalités financières et des pertes de productivité.

En garantissant une pression plus stable et mieux maîtrisée, le nouveau système permet de :

- ✓ Réduire les interruptions imprévues et les temps d'arrêt.
- ✓ Améliorer la qualité du service fourni aux clients, en garantissant une pression stable et conforme aux exigences contractuelles.
- ✓ Renforcer la compétitivité de l'entreprise, en offrant un service plus fiable et en réduisant les coûts d'exploitation.

Les analyses économiques montrent que chaque heure d'arrêt évitée représente une économie importante en termes de production et de satisfaction client, réduisant ainsi les coûts indirects associés aux perturbations du réseau.

V.6.4. Rentabilité et retour sur investissement (ROI)

- ❖ L'implémentation de la nouvelle solution de régulation représente un investissement initial qui doit être comparé aux gains économiques réalisés. Une évaluation préliminaire du retour sur investissement (ROI) montre que :
- ❖ Les économies en consommation énergétique et en pertes de gaz permettent d'amortir l'investissement en moins de deux ans.
- ❖ La diminution des coûts de maintenance et des interruptions du service génère des bénéfices supplémentaires à long terme.
- ❖ L'optimisation du système réduit les risques de pénalités contractuelles, garantissant ainsi une meilleure rentabilité globale.

En conclusion, la solution proposée se révèle économiquement viable et bénéfique sur le long terme, en offrant un meilleur contrôle de la pression, en réduisant les coûts opérationnels et en améliorant la fiabilité du système de transport de gaz.

V.7. Synthèse des résultats obtenus

L'analyse des données recueillies et l'évaluation du système de pression ont permis d'identifier les principaux facteurs contribuant à l'instabilité de la pression. Les tests effectués sur le programme alternatif ont montré une amélioration significative de la régulation de la pression, avec une réduction des fluctuations et une optimisation de la consommation d'énergie. De plus, la mise en place du nouvel algorithme a permis une meilleure prévision des variations de pression et une réponse plus adaptative aux changements de charge.

V.7.1. Recommandations pour l'amélioration continue

Afin de garantir une stabilité optimale du système, plusieurs recommandations peuvent être formulées :

- Renforcer la surveillance des capteurs et des actionneurs pour détecter et corriger rapidement toute anomalie.
- Affiner l'algorithme de régulation en intégrant des paramètres adaptatifs basés sur l'analyse en temps réel.
- Former le personnel technique à l'utilisation du nouveau système pour assurer une exploitation efficace et minimiser les erreurs humaines.
- Mettre en place un suivi périodique des performances pour ajuster les paramètres de contrôle en fonction des conditions réelles d'exploitation.

V.7.2. Perspectives d'évolution du système

L'amélioration du système de pression ouvre la voie à plusieurs développements futurs, notamment :

- L'intégration de l'intelligence artificielle pour une prédiction plus précise des fluctuations de pression.
- L'automatisation avancée des réglages pour une adaptation en temps réel sans intervention humaine.
- L'extension du système à d'autres installations similaires afin de généraliser les bénéfices de la solution adoptée.
- La mise en place d'une interface de supervision intuitive permettant une visualisation en temps réel des données et une interaction plus efficace avec le système**.**

V.8. Conclusion

Dans cette étude, nous avons analysé en détail le système de régulation de pression utilisé dans un environnement industriel et mis en évidence les limites de la régulation PID en place. À travers une approche méthodique, nous avons identifié les dysfonctionnements du système existant et proposé une solution alternative basée sur une nouvelle approche de contrôle. L'implémentation de cette solution a permis d'améliorer la stabilité du système, d'optimiser la consommation énergétique et de réduire les coûts de maintenance.

Les résultats obtenus confirment que la solution proposée constitue une alternative viable au PID classique, en offrant une meilleure réactivité et un contrôle plus précis des variations de pression.

De plus, l'analyse économique a démontré un gain significatif en termes de réduction des pertes de gaz et d'optimisation des ressources.

Conclusion Générale

Conclusion générale

À travers ce projet, nous avons non seulement consolidé nos acquis théoriques dans le domaine de la régulation, mais également découvert toute la richesse de sa mise en œuvre pratique. Ce travail nous a permis d'explorer et de relier plusieurs disciplines telles que la régulation automatique, l'électromécanique et la programmation, ouvrant ainsi la voie à une approche plus globale et interdisciplinaire des systèmes industriels.

Notre mémoire s'est principalement attaché à étudier les phénomènes d'instabilité dans les systèmes de régulation en milieu industriel. L'analyse approfondie du système étudié a mis en évidence les limites de la régulation PID classique, notamment en matière de réactivité et de stabilité. Grâce à une démarche rigoureuse, nous avons pu identifier les principaux dysfonctionnements du système en place et proposer une solution alternative reposant sur une nouvelle stratégie de contrôle.

L'implémentation de cette solution a permis d'obtenir des résultats significatifs : amélioration notable de la stabilité du système, meilleure réactivité face aux variations de pression, optimisation de la consommation énergétique. Par ailleurs, l'analyse économique a révélé une réduction mesurable des pertes de gaz et des coûts de maintenance, confirmant la pertinence et la viabilité de l'approche proposée.

Les diverses difficultés techniques rencontrées et les efforts fournis pour les surmonter nous ont permis d'adopter une vision plus critique et pragmatique de la régulation industrielle, en intégrant les contraintes liées à la réalité du terrain. Comme toute réalisation humaine, ce travail demeure perfectible. C'est pourquoi nous avons proposé, en dernière partie de ce mémoire, des pistes d'amélioration et de développement futur.

En définitive, cette expérience a été particulièrement formatrice et enrichissante, tant sur le plan technique que sur le plan méthodologique, et elle constitue un socle solide pour d'éventuels travaux de recherche ou projets d'ingénierie dans le domaine de la régulation avancée.

Bibliographie

Bibliographie

[1] Manuel d'exploitation de l'entreprise : Ce document a permis de mieux comprendre le fonctionnement global du système de régulation de pression et les procédures opératoires standards.

[2] Alaa-eddine Bordjiba , «Conception et réalisation d'un Régulateur PID numérique de température avec ARDUINO», Mémoire de Master Option: Instrumentation, Université 8Mai 1945 – Guelma, 2019

[3] Adnene TLILI ,Safeyiddine KALLELI, «ASSERVISSEMENT ET RÉGULATION », Cours Département Génie mécanique, Université de ISET - Nabeul, 2014/2015.

[4] BELKACEM OULD-BOUAMAMA Régulation automatique (le 15 juin 1998) www.eudil.fr\eudil\belk\sc00a.htm

[5] Régulation industrielle –Notion de Base Article PDF

[6] R.RHODE ENSEMBLE SCOLAIRE PRADEAU LA SEDE Régulation analogique Article PDF

[7] ALINA BESACON- VODA et SYLVIANNE GENTIL Régulateurs PID analogique et numérique Technique de l'ingénieur : R7416 (03/1999)

[8] Ayeb Fakhreddine , «Conception et implémentation d'une commande PID numérique d'un moteur à courant continu.», Mémoire de Master Option Informatique Industrielle :, Université de LARBI BEN M'HIDI D'OUM EL BOUAGUI , 2013/2014

[9] AMANI Ahmed amine, «LE CONTROLE PID D'UN MOTEUR BRUSHLESS», Mémoire de Master Option Automatique et Informatique Industrielle :, Université de BADJI MOKHTAR ANNABA , 2019.

[10] S. Tamazirt, « Etude de quelques méthodes de synthèse et de calcul des paramètres des régulateurs PID», mémoire de master, UMMTO, 2013.

[11] Document HYDRAULIQUE DE CANALISATIONS DE FLUIDES de IAP (Institue Algérien de pétrole)

[12] Fiches techniques de l'entreprise : Elles ont fourni des informations détaillées sur les composants du système, notamment les capteurs de pression, les vannes PCV, et les actionneurs ainsi que le mode d'emploi.

[13] Manuel de maintenance de l'entreprise : Il a servi de base pour l'analyse des dysfonctionnements du système existant et pour la définition des actions correctives nécessaires.

[14] Bonnes pratiques d'exploitation : Ces recommandations ont été utilisées pour optimiser la gestion et le contrôle de la pression afin d'améliorer la stabilité du système