

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REpubLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة عبد القادر بلقايد - تلمسان -
Université Aboubakr Belkaïd - Tlemcen -
Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Electrotechnique

Spécialité : Commande électrique

Par : ABDELLAOUI Mohammed et BELKACEMI Hicham

Sujet

Contrôle et supervision du système multivariable réel (mod. FLTP/EV) par un API S7 300

Soutenu publiquement, le 23/06/2025, devant le jury composé de :

M Hadj Abdelkader M Amine	PR	Université de Tlemcen	Président
Mme Saidi Farah	MCB	Université de Tlemcen	Examineur
M Meliani Sidi Mohammed	PR	Université de Tlemcen	Encadreur
Mme Ghlam Karima	MCA	Université de Tlemcen	Co-Encadreur

Année universitaire :2024 /2025

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ

In the Name of Allah, the Most Gracious, the Most Merciful.

لَا إِلَهَ إِلَّا أَنْتَ سُبْحَانَكَ إِنِّي كُنْتُ مِنَ الظَّالِمِينَ

“There is no deity except You; exalted are You. Indeed, I have been of the wrongdoers.”

Dédicaces

Je dédie ce travail

À ma famille, elle qui m'a doté d'une éducation digne, son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui :

Particulièrement à mon père feu **Ghouti**, pour le goût à l'effort qu'il a suscité en moi, de par sa rigueur.

À toi ma mère **Oudfel L.**, et grand-mère **Oudfel R.**, ceci est ma profonde gratitude pour ton éternel amour, que ce rapport soit le meilleur cadeau que je puisse t'offrir.

À vous mes frères (**Younes, Abderahmen, Abdellah, ...**) et ma famille (**Houcin F. A., ...**) qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études.

Dédicaces

Je dédie ce travail

À ma famille, elle qui m'a doté d'une éducation digne, son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui :

Particulièrement à mon père feu **Boumediene**, pour le goût à l'effort qu'il a suscité en moi, de par sa rigueur.

À toi mère **Kheira**, ceci est ma profonde gratitude pour ton éternel amour, que ce rapport soit le meilleur cadeau que je puisse t'offrir.

À vous mon frère **Abdelbasset** et mes sœurs **M, S** qui m'avez toujours soutenu et encouragé durant ces années d'études.

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude aux personnes qui ont contribué à la réalisation de ce projet :

- À mon encadrant académique, **Mr MELIANI Sidi Mohammed**, pour son expertise, sa disponibilité et ses précieux conseils tout au long de ce travail.
- À ma co-encadrant , **Mme GHLAM Karima**, pour leur temps consacré à l'évaluation de ce mémoire et leurs suggestions constructives.
- Aux membres du jury, l'examinatrice **Mme SAIDI Farah** et le président **Mr HADJ ABDELKADER Mohamed Amine**, pour leur temps consacré à l'évaluation de ce mémoire et leurs suggestions constructives

Je remercie également **Mr M. MOHMMED** pour avoir mis à disposition les ressources et logicielles nécessaires à ce projet.

Enfin, une pensée spéciale à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont participé à la concrétisation de ce travail.

Contents

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Table de figures	xii
Liste des tableaux	xii
Liste des abréviations	xii
Introduction Générale	xii
1 Chapitre 1: Domaine d’application de la régulation industrielle	4
1.1 Introduction	5
1.1.1 Domaines Utilisant l’Automatique	6
1.1.1.1 Véhicule Électrique	6
1.1.2 Industrie 4.0	8
1.1.3 Intérêt de la Régulation Industrielle avec API	10
1.1.4 Définition de la Régulation Industrielle	10
1.1.4.1 Principes de base de la régulation industrielle	10
1.2 Applications dans les Systèmes Hydrauliques	12
1.2.1 Définition et Importance des Systèmes Hydrauliques	12
1.2.2 Focus sur les Réservoirs Hydrauliques	12

1.2.3	Exemple de Régulation de Niveau dans un Réservoir Hydraulique	14
1.3	Intégration des Technologies de l'Industrie 4.0	15
1.3.1	SCADA	15
1.3.2	Internet des Objets (IoT)	15
1.3.3	Intelligence Artificielle (IA)	16
1.3.4	Jumeaux Numériques	16
1.3.5	Cyber-Sécurité	17
1.3.6	Applications Pratiques de la Régulation dans l'Industrie 4.0 . .	17
1.3.6.1	Optimisation Énergétique	17
1.3.6.2	Maintenance Prédicative	18
1.3.6.3	Automatisation Flexible	18
1.4	Description du banc d'essai	19
1.4.1	Introduction	19
1.4.1.1	Points clés à inclure :	19
1.4.2	Système multivariable réel (mod. FLTP/EV)	21
1.4.3	Panneau de commande du système FLTP/EV	23
1.5	Automate programmable industriel	24
1.5.1	Definition	24
1.5.2	Structure interne	25
1.5.3	Différents types des langages de programmation	26
1.5.4	Fonctionnement cyclique des API	27
1.5.5	Automate programmable siemens s7 300 CPU314 2PN/DP . .	28
1.5.6	Avantages des API	28
1.5.7	Paramétrage de connexion via Ethernet et Profibus	31
1.5.8	Description de l'API utilisé : S7-300	32
1.6	Conclusion	34

2	Chapitre 2 : Fondement de la Régulation Industrielle	35
I	Concept de La Régulation Industrielle et son utilisation	36
2.1	Introduction	37
2.2	Définition et Objectifs de la Régulation Industrielle	37
2.2.1	Qu'est-ce que la Régulation Industrielle ?	37
2.2.2	Critères de performance de la Régulation	37
2.3	Composants d'un Système de Régulation	38
2.3.1	Capteurs	38
2.3.2	Actionneurs	38
2.3.3	Contrôleur	38
2.3.4	Boucles de Régulation	39
2.3.4.1	Boucle fermée	39
2.3.4.2	Boucle ouverte	39
2.4	Types de Régulation	39
2.4.1	Régulateur Tout ou Rien	39
2.4.2	Régulateur Tout ou Rien avec Seuil	40
2.4.3	Régulation PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé)	40
2.4.4	Régulation basées sur l'IA	43
2.4.5	Régulation Multivariable	43
2.4.5.1	Complexité des Systèmes Multivariables	43
2.4.5.2	Approches Spécifiques	44
2.5	Choix et dimensionnement des Régulateurs	44
2.5.1	Méthodes de réglage d'un correcteur PID	44
2.5.2	Méthode pratique de Ziegler-Nichols pour le réglage d'un correcteur PID	44

2.5.2.1	Extrait du régulateur PID par la méthode de Ziegler-Nichols (point critique)	45
2.6	Conclusion	46
II	Exemples sur certaines variables physiques	47
2.1	Régulation de Débit	48
2.1.1	Variation de Débit entre Deux Points (Avant et Après la Vanne)	48
2.1.2	Fonction Dynamique de la Vanne	51
2.2	Régulation de niveau	52
2.3	Régulation de Pression	54
2.4	Régulation de température	56
3	Chapitre 3 : Application de la régulation sur le prototype réel	60
3.1	Description du prototype réel	61
3.1.1	Architecture et commande d'un système hydraulique	61
3.2	Logiciel TIA Portal	67
3.2.1	Définition	67
3.2.2	Logiciels et modules principaux :	67
3.2.3	Création d'un projet utilisant le S7-300 avec logiciel TIA Portal	68
3.2.4	PID COMPACT	71
3.2.5	Traitement des valeurs analogiques	73
3.2.6	Développement de notre IHM	74
3.2.6.1	Définition d'une IHM	74
3.2.6.2	Création d'une vue dans l'IHM	74
3.2.6.3	Liaison entre l'API et l'IHM	75
3.2.6.4	Configuration de l'interface de PG/PC	76
3.2.6.5	Vue principale de l'IHM	78

3.2.6.6	Vues secondaires de l'IHM	79
3.2.7	Câblage entre API et le système	80
3.2.8	Interface IHM en temps réel	81
3.3	Identification des paramètres du correcteur PID	83
3.3.1	Application de la méthode de Ziegler et Nichols sur les grandeurs physiques	83
3.3.2	Détermination des paramètres du correcteur	85
3.3.3	Résultats obtenus et interprétation.	87
3.4	Conclusion	89

Conclusion Générale **101**

List of Figures

1.1	Grandeurs non mesurables du véhicule électrique.	7
1.2	Industrie4.0 [30]	9
1.3	Combinaison de l'industrie 4.0 [3]	9
1.4	Siemens SIMATIC S7-300 PLC (Programmable Logic Controller) [14]	20
1.5	Système multivariable [14]	21
1.6	Unité externe mod. FLTP-U/EV [14]	22
1.7	Panneau de commande du système FLTP/EV [14]	24
1.8	Structure interne d'automate	26
1.9	Câble Ethernet croisé et droit [21]	31
1.10	Câble Profibus [34]	32
1.11	API S7-300 [38]	33
2.1	Régulation en boucle fermée [6]	39
2.2	Régulation en boucle ouverte [6]	39
2.3	Régulation Tout ou Rien	40
2.4	Régulation Tout ou Rien avec Seuil	40
2.5	Régulateur proportionnel	41
2.6	Schéma fonctionnel du régulateur proportionnel-intégrale (PI)	42
2.7	Schéma fonctionnel du régulateur proportionnel-Intégrale-dérivée (PID)	43
2.8	Relation de bernoulli entre deux surfaces [13]	49
2.9	Remplissage du réservoir avec un débit entrant et sortant [1]	53

3.1	Unité externe mod. FLTP-U/EV [14]	62
3.2	Vanne proportionnelle PVC [14]	63
3.3	Capteur de débit [14]	63
3.4	Capteur de pression [14]	64
3.5	Pressostat [14]	64
3.6	Capteur piézométrique [14]	65
3.7	Connectique du banc didactique du système modèle FLTP-1/EV [14] .	66
3.8	Photo réel de notre Système automatisé	66
3.9	Icône du logiciel TIA Portal [33]	67
3.10	Fenêtre de création d'un nouveau projet	68
3.11	Fenêtre pour l'insertion d'un API	69
3.12	Choix de la CPU	69
3.13	Vue principale du projet	70
3.14	Insertion d'un bloc OB35	70
3.15	Schéma fonctionnel du PID [33]	72
3.16	Schéma du bloc "Scale" dans TIA Portal	73
3.17	Fenêtre pour l'insertion d'un appareil WinCC RT pour création d'un IHM	75
3.18	Liaison entre l'API et l'IHM	76
3.19	Configuration de l'interface PG/PC ²	77
3.20	Création d'une variable IHM	78
3.21	Interface IHM de l'unité externe mod. FLTP-U/EV	79
3.22	Vue secondaire de l'IHM	80
3.23	Câblage entre API et le système	81
3.24	Simulation de notre IHM dans le cas la régulation de la temperature et de la pression	82
3.25	Réponse de la grandeur "Débit"	83

3.26 Réponse de la grandeur "Niveau"	84
3.27 Réponse de la grandeur "Pression"	84
3.28 Réponse de la grandeur "Temperature"	85
3.29 Réponse de la grandeur "Débit" après régulation	87
3.30 Réponse de la grandeur "Niveau" après régulation	88
3.31 Réponse de la grandeur "Pression" après régulation	89
3.32 Bloc DB	94
3.33 Bloc PID	94

List of Tables

- 1.1 Types de langages de programmation et leurs intérêts 27
- 2.1 Paramètres du régulateur PID 46
- 3.1 Résultats obtenus 86
- 3.2 Adresse des Entrées 93
- 3.3 Adresse des Sorties 93

Liste des abréviations

[OpenCV] AI Intelligence Artificielle IOT Internet des Objets CPSSystèmes Cyber-Physiques
PID Proportionnel Intégral Dérivé RTU Remote Terminal Units MTU Master Terminal
Unit

IHM Interface Homme-Machine SCADA Supervisory Control and Data Acquisition
CPSSystème Cyber-Physique TIA Portal Totally Integrated Automation Portal

ANN Réseaux de Neurones Artificiels ST Texte Structuré IL Liste d'Instructions SFC-
Sequential Function Chart FBDFonction Bloc Diagram MRPMedia Redundancy Pro-
tocol MPIMulti Point Interface CBAComponent Based Automation

$r(t)$ Consigne

$y(t)$ Valeur mesurée par le capteur

$e(t)$ Erreur

T_r Temps de réponse

D Dépassement

P Action proportionnelle

$U(t)$ Entrée du système

I Action intégrale

D Action dérivée

K_p Gain proportionnel

$Y(s)$ Sortie du système (domaine de Laplace)

$G(s)$ Fonction de transfert du système

K_{pc} Gain critique (limite)

T_c Période des oscillations critiques

Q_v Débit volumique

dV Volume élémentaire

S Surface

dt Intervalle de temps

P Pression

v Vitesse

h Hauteur

ρ Masse volumique

u Ouverture relative de la vanne

C_v Coefficient de débit

$U(s)$ Entrée en position (domaine de Laplace)

p Pôle

K_s Coefficient lié à la sortie du réservoir

F Force

f Coefficient de frottement

L Longueur de la conduite

D Diamètre de la conduite

J Joule

W Travail

q Quantité de chaleur

ΔU Variation d'énergie interne

$T(t)$ Température à l'instant t

T_{amb} Température ambiante

$^{\circ}C$ Degré Celsius

Introduction Générale

La régulation industrielle est un pilier fondamental des systèmes automatisés contemporains. Elle permet de contrôler avec précision des variables critiques (niveau, pression, débit, température) malgré les perturbations externes. Son impact est transversal : elle permet d'optimiser l'efficacité énergétique, de garantir la stabilité des processus et de renforcer la sécurité des installations, ce qui en fait une fonctionnalité indispensable dans des secteurs clés comme l'énergie, la gestion hydraulique ou la production manufacturière.

Application aux systèmes hydrauliques : Dans les régions semi-arides, comme l'Algérie, où la gestion durable des ressources hydriques est un enjeu stratégique, la régulation industrielle joue un rôle vital. Elle permet d'optimiser le stockage et la distribution d'eau potable, de piloter les stations de dessalement et de sécuriser les infrastructures agricoles et urbaines. Ces systèmes, basés sur la manipulation de fluides sous pression, nécessitent une régulation fine pour ajuster les débits et pressions en réponse aux variations de la demande, tout en réduisant les pertes énergétiques.

Objectif principal : Mise en service d'un prototype expérimental

Ce projet s'articule autour d'un système hydraulique multivariable réel (modèle FLTP/EV), situé au laboratoire pédagogique d'API. Composé de deux réservoirs interconnectés, de capteurs (niveau, débit, température, pression) et d'actionneurs électropneumatiques (pompes, vannes proportionnelles), ce prototype sert de plateforme pour

l'étude et l'implémentation de stratégies de régulation avancées. Son architecture reproduit les défis industriels réels, combinant complexité physique (interactions entre variables) et exigences technologiques (précision, réactivité).

Structure du manuscrit

Notre manuscrit comporte : une introduction générale, 03 chapitres et une conclusion générale.

Chapitre 1 : décrit le domaine d'application de la régulation industrielle, le contexte théorique, l'évolution vers l'Industrie 4.0, l'intérêt des API et en fin une présentation détaillée du prototype est fournie.

Chapitre 2 : repose sur les fondements de la régulation industrielle, les principes des boucles de contrôle, ainsi que les méthodes de réglage (Ziegler-Nichols), la typologie des régulateurs (PID, multivariable) et la modélisation mathématique des processus hydrauliques.

Chapitre 3 : qui est le chapitre clé et principal de notre travail qui s'articule sur l'implémentation pratique et la configuration matérielle (câblage, architecture), la programmation de l'API Siemens S7-300 via TIA Portal, le développement d'une IHM sous WinCC RT Advanced et la validation expérimentale des régulations monovariabes.

Chapter 1

Chapitre 1: Domaine d'application de la régulation industrielle

1.1 Introduction

La régulation industrielle est l'un des fondements essentiels des systèmes automatisés modernes. Elle permet de contrôler avec précision des variables critiques telles que le niveau, la pression, le débit ou la température dans divers processus industriels. Dans un contexte marqué par l'émergence de l'Industrie 4.0, cette discipline a évolué pour proposer des solutions toujours plus intelligentes, intégrant des technologies de pointe telles que l'Internet des objets (IoT), l'intelligence artificielle (IA) et les jumeaux numériques.

Ce chapitre explore les principes de la régulation industrielle appliquée aux systèmes hydrauliques, en mettant l'accent sur les réservoirs, qui jouent un rôle central dans divers secteurs d'activité :

1. La gestion de l'eau potable (stations de traitement, réseaux urbains) .
2. L'industrie pétrolière et chimique (stockage, sécurité des fluides) .
3. L'agriculture (irrigation automatisée) .
4. L'énergie (centrales hydroélectriques).

Nous présenterons également des exemples concrets, tels que des usines, des infrastructures urbaines ou des applications agricoles. Nous aborderons également l'impact des technologies 4.0 sur l'optimisation énergétique et la maintenance prédictive. Enfin, nous aborderons les défis actuels, tels que la cybersécurité et le coût d'implémentation, tout en soulignant les avantages opérationnels et environnementaux de ces systèmes.

1.1.1 Domaines Utilisant l'Automatique

L'automatique joue un rôle crucial dans de nombreux domaines :

1. **Industries manufacturières** : Contrôle des lignes de production.
2. **Énergie** : Gestion des centrales électriques et des réseaux intelligents.
3. **Transport** : Systèmes ferroviaires, automobiles autonomes.
4. **Agriculture** : Irrigation automatisée.

1.1.1.1 Véhicule Électrique

En général, les sorties des systèmes dépendent de plus que de simples valeurs quantifiables ; ils sont également sensibles à des grandeurs supplémentaires, appelées perturbations, qui varient de manière imprévisible. À titre illustratif, la fluctuation de la tension d'induit U_a (grandeur mesurable) des moteurs affecte la vitesse V_t d'une voiture électrique. Cependant, la vitesse du véhicule est également influencée par des facteurs tels que la charge C_r , la pente de la route P_r , la vitesse frontale du vent V_v et sa direction. La régulation des véhicules électriques est un domaine en pleine expansion, sous l'effet de la demande croissante de mobilité durable. Les systèmes de régulation permettent de contrôler la vitesse, le couple et la puissance des moteurs électriques, mais aussi d'optimiser l'efficacité énergétique et la gestion de la batterie. Dans les véhicules électriques, la régulation est souvent réalisée à l'aide de boucles de rétroaction fermées qui mesurent la vitesse du moteur, le courant, la tension de la batterie et d'autres grandeurs afin d'ajuster les paramètres du système en temps réel. Les perturbations telles que les variations de la tension de la batterie, les changements de charge et les perturbations environnementales sont également prises en compte pour garantir une régulation précise et fiable. En résumé, la régulation des véhicules électriques est un exemple important de l'utilisation de systèmes de régulation pour contrôler des

systems complex in real time, in order to optimize their performance and their energy efficiency [44].

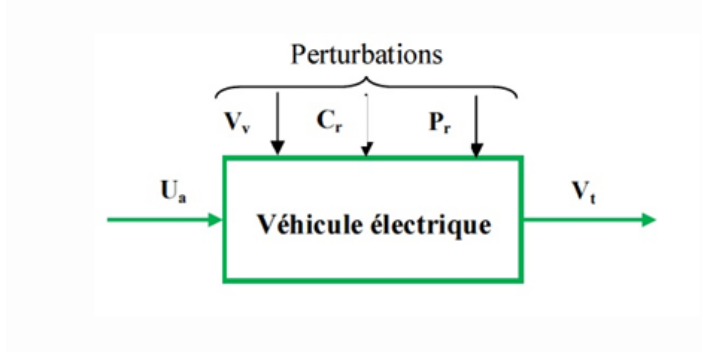


Figure 1.1: Grandeurs non mesurables du véhicule électrique.

1.1.2 Industrie 4.0

L'Industrie 4.0 représente une révolution technologique marquée par l'intégration des technologies numériques, de l'Internet des Objets (IoT), de l'intelligence artificielle (IA) et des systèmes cyber-physiques (CPS). Dans ce contexte, la régulation industrielle évolue pour répondre aux exigences croissantes en termes de précision, d'efficacité énergétique et de flexibilité. Les systèmes de régulation modernes exploitent désormais des outils avancés tels que les algorithmes prédictifs, l'apprentissage automatique et les jumeaux numériques pour optimiser les processus industriels.

Cette section explore en détail comment l'Industrie 4.0 transforme la régulation industrielle, en mettant l'accent sur les technologies clés, les applications pratiques et les défis associés [47].

L'Industrie 4.0 repose sur l'intégration des technologies numériques dans les processus industriels. Elle inclut :

1. **Internet des Objets (IoT)** : Collecte de données en temps réel.
2. **Intelligence Artificielle (IA)** : Optimisation des processus.
3. **Jumeaux numériques** : Simulation virtuelle des systèmes physiques.



Figure 1.2: Industrie4.0 [30]

La figure suivante illustre une autre approche complémentaire, intégrant les principes du lean management.

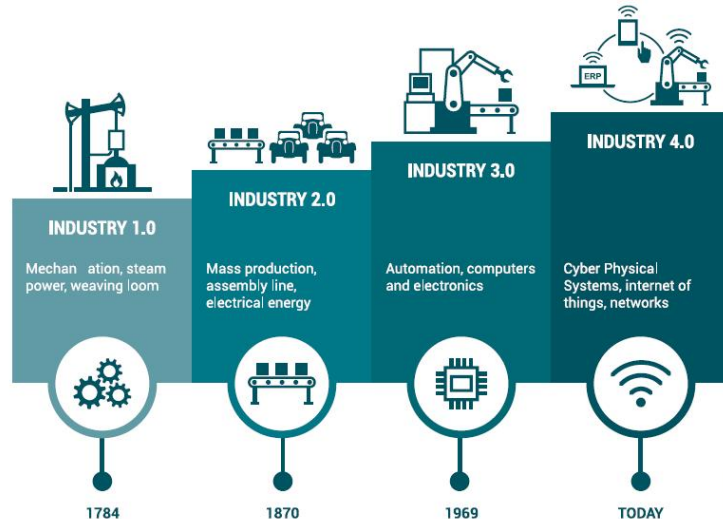


Figure 1.3: Combinaison de l'industrie 4.0 [3]

- Dans le contexte de la révolution industrielle portée par l'Industrie 4.0, où les technologies connectées sont au cœur des processus de production, l'élaboration d'un cadre réglementaire robuste s'avère impérative. C'est dans cette perspective que les API se positionnent comme une solution majeure. Elles allient la

flexibilité nécessaire pour soutenir l'innovation à la standardisation, la sécurité et l'interopérabilité, des composantes essentielles à une régulation industrielle efficace.

1.1.3 Intérêt de la Régulation Industrielle avec API

Les Automates Programmables Industriels (API) permettent de gérer efficacement les systèmes complexes. Ils sont particulièrement utiles dans la régulation des réservoirs hydrauliques, où ils assurent :

- Précision dans le contrôle des variables (niveau, pression, débit).
- Réduction des pertes d'énergie et des interventions manuelles.

1.1.4 Définition de la Régulation Industrielle

La régulation et le contrôle des processus sont étroitement liés, car la régulation consiste à maintenir une grandeur physique à une valeur cible à l'aide d'un système de contrôle prenant en compte les perturbations. Les exemples que vous avez donnés illustrent bien cette idée : dans chaque cas, il y a une grandeur physique à maintenir à une valeur souhaitée, et un système de contrôle permet de surveiller et d'ajuster cette grandeur en réponse aux perturbations [18].

1.1.4.1 Principes de base de la régulation industrielle

Contexte Général: La régulation industrielle est essentielle pour maintenir la performance des systèmes dans diverses industries. Ses objectifs principaux sont :

- Stabilité : Maintenir les variables proches de la consigne.
- Précision : Minimiser les erreurs.
- Rapidité : Réagir rapidement aux perturbations.

- Robustesse : Fonctionner correctement malgré les incertitudes.

Composants Essentiels: Les composants essentiels d'un système de régulation incluent :

- Capteurs : Mesurent les variables physiques (pression, température, niveau).
- Actionneurs : Modifient les variables contrôlées (vannes, pompes).
- Contrôleurs : Analysent les données des capteurs et génèrent des commandes pour les actionneurs.

1.2 Applications dans les Systèmes Hydrauliques

1.2.1 Définition et Importance des Systèmes Hydrauliques

Un système hydraulique est un ensemble de composants utilisant un fluide incompressible, généralement de l'huile, mis sous pression pour transmettre de l'énergie et effectuer un travail mécanique. Ce principe repose sur les lois des liquides et la propriété d'incompressibilité des fluides, ce qui permet une transmission d'énergie stable, précise et puissante [24].

Le système hydraulique, en actionnant les actionneurs, permet de générer un débit qui induit des mouvements mécaniques précis et puissants. Cette technologie est particulièrement adaptée aux applications industrielles, car elle permet d'exercer une force importante avec une grande précision et une fiabilité élevée [16].

Les systèmes hydrauliques manipulent des fluides sous pression. Ils sont utilisés dans :

- Centrales hydroélectriques.
- Stations de traitement des eaux usées.
- Systèmes de levage en usine.

1.2.2 Focus sur les Réservoirs Hydrauliques

Les réservoirs hydrauliques stockent et distribuent des fluides. Les variables à réguler incluent :

- Pression.
- Niveau d'eau.
- Température.

- Débit.

Exemple sur les réservoirs se trouvant dans la région de la wilaya de Tlemcen

Exemple 1 : Réservoir de Boudghène (Tlemcen)

Capacité : 2000 m³

Rôle : Ce réservoir joue un rôle clé dans le stockage et la régulation de l'eau potable destinée à la distribution urbaine. Il permet de maintenir une pression stable dans le réseau et d'assurer un approvisionnement continu même en cas de variations de la demande.

Application de la régulation : Des systèmes automatisés, potentiellement pilotés par des API comme le Siemens S7-300, peuvent contrôler les vannes d'entrée et de sortie du réservoir en fonction des niveaux mesurés, optimisant ainsi le remplissage et la distribution tout en évitant les débordements ou les ruptures de charge.

Exemple 2: Réservoir de Mansourah 2x2000

(coordonnées X/Y/Z : 652 246,29 / 3 859 301,60 / 866,74 m).

Capacité : 4 000 m³ (2 cuves de 2 000 m³).

Rôle : Ce réservoir à double-capacité couvre les besoins des quartiers périphériques et industriels, en stockant l'eau traitée avant sa distribution.

Application de la régulation : Des boucles de contrôle indépendantes, gérées par l'API Siemens, alternent l'utilisation des deux cuves pour assurer une continuité de service lors des opérations de nettoyage ou de réparation.

1.2.3 Exemple de Régulation de Niveau dans un Réservoir Hydraulique

Dans une centrale hydroélectrique, des capteurs IoT mesurent le niveau d'eau. Des algorithmes prédictifs ajustent les vannes ou les pompes via un API, améliorant ainsi la précision et réduisant les pertes.

Régulation multivariable dans une station industrielle :

Dans le cadre des procédés industriels d'envergure, il s'avère fréquemment impératif de superviser de manière concomitante plusieurs grandeurs physiques, à l'instar du niveau, de la température et du débit. Cette tâche est assurée par un système de régulation multivariable, qui coordonne les actions sur différents équipements afin d'atteindre les objectifs de performance.

À titre d'illustration, dans une station de traitement de l'eau, le système de régulation assure la gestion intégrée des pompes, des vannes et des dispositifs de chauffage. Cette coordination permet d'optimiser à la fois la qualité de l'eau traitée et le débit de sortie, tout en assurant une utilisation efficace des ressources énergétiques et hydrauliques.

Le système multivariable prend en compte les interactions entre les différentes variables contrôlées. Cette approche rend la régulation plus complexe, mais aussi plus performante, en garantissant la stabilité et la précision du procédé global [10].

Exemple de régulation PI dans le projet MPS PA

Dans le cadre de la modélisation de la station de filtration MPS PA, un régulateur PI (proportionnel-intégral) a été implémenté pour contrôler le niveau du réservoir cible, en l'absence de capteur analogique physique.

SP-INT (consigne) : (80), correspondant au niveau souhaité.

PV-IN (mesure) : Signal généré par un capteur virtuel,

converti via le bloc SCALE pour transformer la tension analogique (0–10 V) en

pourcentage (0–100).

GAIN (gain proportionnel) : 2.0 pour une réponse rapide aux écarts.

I-SEL (action intégrale) : Activée (TRUE) pour éliminer l’erreur résiduelle.

Le régulateur pilote une électrovanne proportionnelle qui ajuste le débit d’eau, tandis que l’IHM WinCC RT Advanced affiche en temps réel le niveau, la consigne et les courbes de suivi. Cette approche, bien que virtuelle, a permis de stabiliser le niveau malgré les perturbations (ex. vidanges), démontrant l’efficacité de l’intégration logicielle (TIA Portal) et matérielle (API S7-300) pour des systèmes industriels complexes [4].

1.3 Intégration des Technologies de l’Industrie 4.0

1.3.1 SCADA

Le SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition) s’agit d’une architecture informatique qui permet aux organisations industrielles de surveiller, de contrôler et de gérer en temps réel des processus, des machines et des infrastructures. Il repose sur une combinaison de matériel (capteurs, actionneurs, RTU, API) et de logiciels (interfaces homme-machine, bases de données, systèmes d’alarme) pour collecter, traiter et présenter des données opérationnelles [19].

1.3.2 Internet des Objets (IoT)

L’IoT permet une communication en temps réel entre les capteurs, les actionneurs et les contrôleurs. Cette interconnectivité améliore considérablement la capacité des systèmes de régulation à surveiller et ajuster les variables physiques en continu. Par exemple, dans une usine intelligente, des capteurs IoT peuvent transmettre des données critiques (température, pression, niveau, etc.) directement au contrôleur central, qui

ajuste ensuite les paramètres du système en fonction des consignes [8].

Exemple d'application : Dans une centrale électrique, des capteurs IoT surveillent en permanence la température et la pression des turbines. Ces données sont analysées en temps réel pour ajuster les paramètres de fonctionnement et éviter les surcharges.

L'IoT collecte des données en temps réel sur les variables hydrauliques. Exemple : Surveillance de la pression dans une centrale électrique [9].

1.3.3 Intelligence Artificielle (IA)

L'IA joue un rôle crucial dans l'amélioration des performances des systèmes de régulation. Les algorithmes d'apprentissage automatique peuvent analyser d'immenses volumes de données pour identifier des tendances, prédire des anomalies et optimiser les paramètres de contrôle. Par exemple, des modèles basés sur des réseaux neuronaux peuvent apprendre à anticiper les variations des variables contrôlées et ajuster les commandes en conséquence [17].

Exemple d'application : Dans une chaîne de production automobile, un système de régulation alimenté par IA peut ajuster automatiquement la vitesse des convoyeurs en fonction de la demande en temps réel, minimisant ainsi les pertes et maximisant l'efficacité.

L'IA analyse les données pour anticiper les anomalies et optimiser les performances. Exemple : Ajustement des paramètres des pompes dans une usine pétrolière.

1.3.4 Jumeaux Numériques

Les jumeaux numériques sont des répliques virtuelles de systèmes physiques qui permettent de simuler, analyser et optimiser leur comportement. En régulation industrielle, les jumeaux numériques sont utilisés pour tester différents scénarios de contrôle avant

de les implémenter dans le système réel. Cela réduit les risques d'erreurs et améliore la précision des décisions [36].

Exemple d'application : Une usine chimique peut utiliser un jumeau numérique pour simuler les effets d'un changement de température sur la qualité du produit final, sans avoir à perturber le processus physique.

Les jumeaux numériques simulent les systèmes physiques pour tester différents scénarios avant leur application réelle.

1.3.5 Cyber-Sécurité

Les systèmes cyber-physiques combinent des composants physiques (capteurs, actionneurs) avec des logiciels intelligents pour créer des systèmes autonomes et interconnectés. En régulation industrielle, les CPS permettent une gestion proactive des processus, où les systèmes ajustent automatiquement leurs paramètres en fonction des données collectées [22].

Exemple d'application : Dans une usine de fabrication additive (impression 3D), un système CPS peut ajuster en temps réel la température et la vitesse de dépôt de matériaux pour garantir une qualité optimale.

Les systèmes interconnectés nécessitent des mesures de sécurité robustes pour protéger contre les cyberattaques.

1.3.6 Applications Pratiques de la Régulation dans l'Industrie 4.0

1.3.6.1 Optimisation Énergétique

La régulation industrielle moderne est souvent utilisée pour réduire la consommation d'énergie dans les installations industrielles. Par exemple, des systèmes de régulation basés sur l'IA peuvent ajuster automatiquement les paramètres des moteurs électriques ou des systèmes de chauffage pour minimiser les pertes énergétiques tout en maintenant

les performances requises [28].

Exemple d'application : Dans une installation de climatisation industrielle, un contrôleur intelligent ajuste la puissance des compresseurs en fonction de la charge thermique réelle, réduisant ainsi la consommation d'électricité.

1.3.6.2 Maintenance Prédictive

La régulation industrielle dans le cadre de l'Industrie 4.0 permet également de mettre en œuvre des stratégies de maintenance prédictive. En analysant les données provenant des capteurs en temps réel, les systèmes peuvent détecter des signes de défaillance potentielle et planifier les interventions avant qu'une panne ne survienne [27].

Exemple d'application : Dans une usine sidérurgique, un système de régulation analyse les vibrations des machines pour détecter des anomalies et programmer des inspections avant qu'une défaillance critique ne se produise.

1.3.6.3 Automatisation Flexible

L'automatisation flexible est un autre domaine où la régulation industrielle s'adapte à l'Industrie 4.0. Grâce à des systèmes de régulation avancés, les lignes de production peuvent être reconfigurées rapidement pour répondre à des demandes changeantes ou à des variations de produits [23].

Exemple d'application : Dans une usine de fabrication de biens de consommation, un système de régulation ajuste automatiquement les paramètres des machines pour passer d'un produit à un autre sans interruption.

Après avoir donné un aperçu sur l'intérêt de la régulation dans le monde industrielle et particulièrement dans le domaine de la gestion hydrauliques, dans le paragraphe suivant, nous allons vous décrire un banc d'essai réel dédié à la pédagogie et principalement à l'initiation à la régulation industrielle mono et multi-variable

1.4 Description du banc d'essai

1.4.1 Introduction

Ce projet de fin d'études vise à améliorer l'enseignement des Automates Programmable Industriels (API) en proposant une solution pédagogique concrète. Dans ce cadre, nous avons mis en service un banc d'essai et essayer de fournir un manuel dédié aux étudiants, centré sur la régulation industrielle par correcteur PID intégré dans un automate API s7-300. Pour renforcer l'aspect pratique, cette régulation sera testée et validée sur un système réel disponible au sein du laboratoire pédagogique 'API', Faculté de Technologie, Chetouane, Tlemcen. Cette section présente la description du banc, son intégration matérielle et son application didactique.

1.4.1.1 Points clés à inclure :

- **Objectif principal** : Améliorer l'enseignement des API par une approche pratique combinant théorie (manuel) et application réelle (TP)
- **Composants du prototype**
 - Manuel pédagogique sur la régulation PID
 - Dispositif matériel (automate API s7-300)
 - Banc de test au laboratoire pédagogique
- **Innovation pédagogique**
 - Lien direct entre théorie PID et implémentation industrielle
 - Support adapté au niveau des étudiants
- **Validation**
 - Tests fonctionnels sur le système réel du labo

– Évaluation par les étudiants (questionnaires)

- **Résultats attendus**

– Meilleure compréhension des concepts PID

– Acquisition de compétences pratiques en régulation

- **Mots clés**

– Niveau , température , Pression

– Régulateur industriel

– API , WinCC

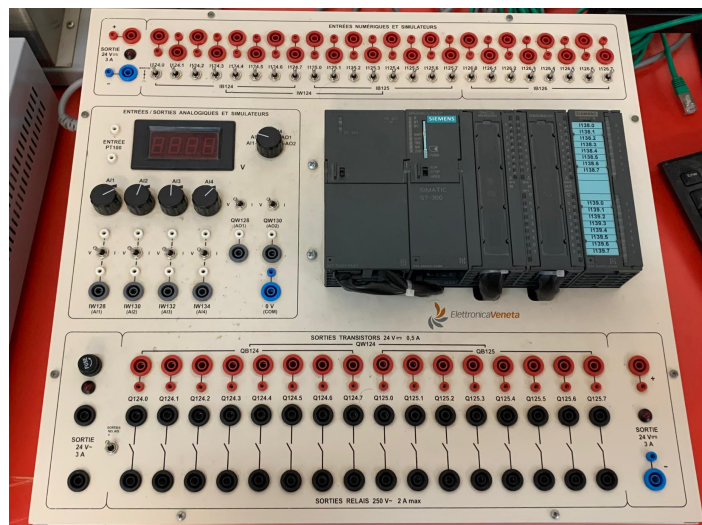


Figure 1.4: Siemens SIMATIC S7-300 PLC (Programmable Logic Controller) [14]

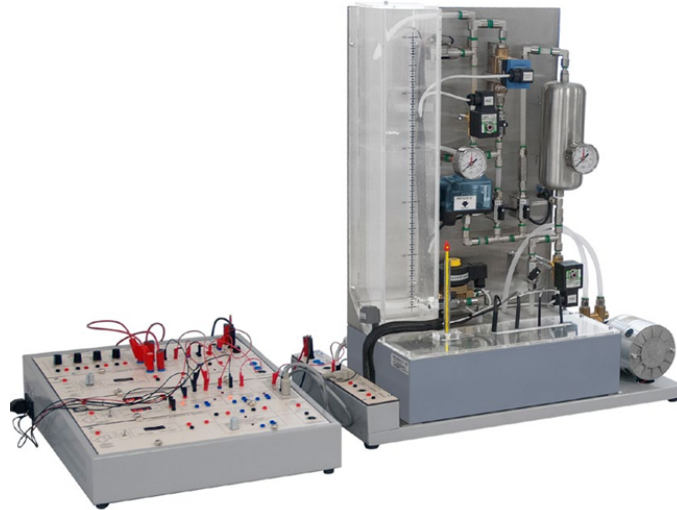


Figure 1.5: Système multivariable [14]

1.4.2 Système multivariable réel (mod. FLTP/EV)

Le système mod. FLTP/EV, développé par Elettronica Veneta, est un banc d'expérimentation didactique conçu pour l'analyse théorique et pratique des systèmes de contrôle multivariables dans l'industrie. Ce dispositif permet d'effectuer une étude simultanée de quatre grandeurs physiques fondamentales dans le cadre des procédés industriels:

- Débit (Flow)
- Niveau (Level)
- Température (Temperature)
- Pression (Pressure)

Ce système inclut des capteurs et des actionneurs réels, fournissant une plateforme exhaustive pour la mise en œuvre et l'expérimentation de stratégies de contrôle multivariable. Dans le cadre de la formation technique, ce concept est employé afin d'illustrer la complexité des interactions entre les variables, ainsi que la nécessité d'une régulation coordonnée [14].

Propriétés importantes

- **Commandabilité** : possibilité de contrôler l'ensemble des états via les entrées.

- **Stabilité et robustesse** : assurer un comportement stable malgré les perturbations et incertitudes [14].



Figure 1.6: Unité externe mod. FLTP-U/EV [14]

1.4.3 Panneau de commande du système FLTP/EV

Ce dispositif de commande, conçu pour un usage pédagogique, se présente comme un outil essentiel pour les étudiants et les techniciens désireux d'acquérir une compréhension approfondie des principes de la régulation multivariable. En effet, il leur permet de mettre en œuvre différentes stratégies de contrôle et de développer des compétences pratiques en automatisme industriel.

Ce panneau comprend plusieurs éléments essentiels :

Boutons poussoirs, Voyants lumineux (LEDs), Connecteurs et bornes de raccordement, Potentiomètres, Afficheurs et indicateurs analogiques/digitaux, (optionnels)

Fonctionnalités principales du panneau de commande

- **Configuration des boucles de régulation** : sélection des variables à contrôler, ajustement des paramètres du régulateur (gain, intégrale, dérivée).
- **Application de perturbations** : simulation de variations soudaines ou progressives sur les entrées du système (ex. ouverture/fermeture de vannes, variation de débit).
- **Observation et apprentissage** : suivi en temps réel des réponses du système pour analyser la stabilité, la précision et la rapidité de la régulation.

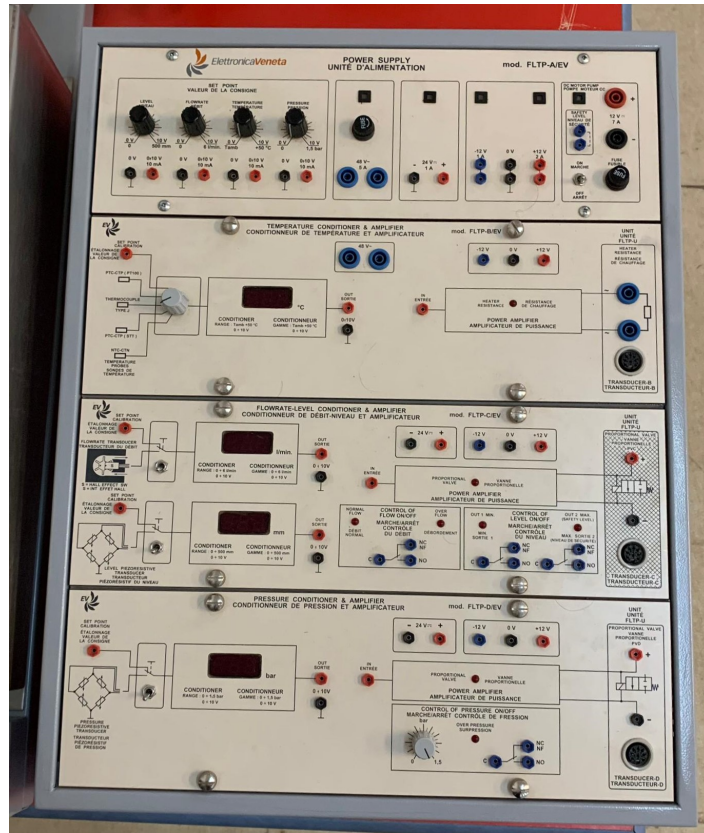


Figure 1.7: Panneau de commande du système FFTP/VE [14]

1.5 Automate programmable industriel

1.5.1 Definition

Un automate programmable est un appareil dédié au contrôle d'une machine ou d'un processus industriel, constitué de composants électroniques, comportant une mémoire programmable par un utilisateur non informaticien, à l'aide d'un langage adapté. En d'autres termes [39].

Les API modernes, comme le Siemens S7-300, permettent de gérer les systèmes hydrauliques avec précision. Ils intègrent des algorithmes avancés pour anticiper les variations et optimiser les performances.

Un automate programmable industriel (API) est une machine électronique spécialisée dans la conduite et la surveillance en temps réel de processus industriels et tertiaires. Il exécute une suite d'instructions introduites dans ses mémoires sous forme de pro-

grammes, et s'apparente par conséquent aux machines de traitement de l'information.

Trois caractéristiques fondamentales le distinguent des outils informatiques tels que les ordinateurs utilisés dans les entreprises et le tertiaire :

- Il peut être directement connecté aux capteurs et pré-actionneurs grâce à ses entrées/sorties industrielles.
- Il est conçu pour fonctionner dans des ambiances industrielles sévères (Température, vibrations, microcoupures de la tension d'alimentation, parasites, etc.).
- Enfin, sa programmation à partir de langages spécialement développés pour le traitement de fonctions d'automatisme facilite son exploitation et sa mise en œuvre [20], [46].

1.5.2 Structure interne

- **Processeur**

Rôle principal le traitement des instructions qui constituent le programme de fonctionnement de l'application (les fonctions logiques ET, OU, les fonctions de temporisation, de comptage, de calcul PID, etc).

- **Mémoire**

Elle est conçue pour recevoir, gérer, stocker des informations issues des différents secteurs du système que sont le terminal de programmation et le processeur, qui lui gère et exécute le programme .

- **Alimentation**

Tous les automates actuels utilisent un bloc d'alimentation alimenté en $240 V_{ac}$ (tension alternative) et délivrant une tension de $24 V_{cc}$ (tension continue).

- Interfaces

Les interfaces d'entrées comportent des adresses d'entrées, une pour chaque capteur relié. Les interfaces de sorties comporte des adresses de sorties, une pour chaque pré-actionneur. Le nombre d'entrées / sorties varie suivant le type d'automate. Les cartes d'entrées / sorties ont une modularité de 8, 16 ou 32 voies. Elles admettent ou délivrent des tensions continues 0 - 24 V_{cc}.

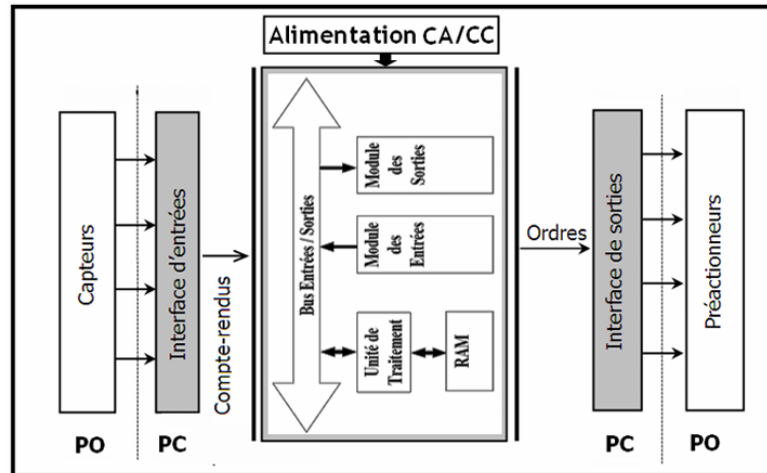


Figure 1.8: Structure interne d'automate

1.5.3 Différents types des langages de programmation

Le tableau suivant présente les différents types de langage de programmation des API.

Type	Langage	Intérêt
Graphique	GRAFCET ou SFC	de haut niveau permet la programmation aisée de tous les procédés séquentiels.
	Schéma par blocs ou FBD	permet de programmer graphiquement à l'aide de blocs, représentant des variables, des opérateurs ou des fonctions. Il permet de manipuler tous les types de variables.
	Schéma à relais ou LD	dédié à la programmation d'équations booléennes.
Textuel	Texte structuré ou ST	de haut niveau. Il permet la programmation de tout types d'algorithmes plus ou moins complexes.
	Liste d'instructions ou IL	bas niveau est un langage à une instruction par ligne. Il peut être comparé au langage assembleur.

Table 1.1: Types de langages de programmation et leurs intérêts

- Pour programmer l'automate, l'automaticien peut utiliser :
 - une console de programmation qui a l'avantage d'être portable.
 - un PC pour une programmation plus conviviale, avec lequel l'automate peut communiquer.

1.5.4 Fonctionnement cyclique des API

La plupart des API fonctionnent selon un cycle déterminé par le statut synchrone des entrées et des sorties :

- Traitement interne des données : commande et actualisation du système.
- Exécution de programme : le processeur accomplit l'action. Prise en charge des entrées : enregistré dans la mémoire de données .
- Exécution du programme : le processeur accomplit l'action.
- Émission des sorties et mise en mémoire. Il existe d'autres modes de fonction-

nement :

- Synchrones par rapport aux entrées seulement.
- asynchrone.

1.5.5 Automate programmable siemens s7 300 CPU314 2PN/DP

Siemens S7-300 CPU 314-2 PN/DP est un automate programmable modulaire appartenant à la gamme S7-300 de Siemens. Voici ces caractéristiques essentiels :

Mémoire de travail de 192 ko ; 0,06 ms/kilo-instructions .

- Cycle d'exécution 100 Ms

- Entrées / Sorties :

* 24 entrées numériques : : Tension d'entrée nominale 24 V cc.

* 16 sorties numériques (DI24/DO16) : Tension nominale de charge 24 V cc.

* 5 entrées analogiques (AI5) intégrées : Sortie de tension 10 V et de courant 20 mA.

* 2 sorties analogiques Sortie de tension 10 V et Sortie de courant 20 mA 2 .

* 4 voies de comptage et de mesure avec codeurs incrémentaux 24 V (60 kHz) .

- Fonction de positionnement intégrée ; 2 ports ; MRP ; PROFINET CBA ; PROFINET Proxy CBA ; protocole de transport TCP/IP .

- Interface MPI/DP combiné (maître MPI ou DP ou bien esclave DP) .

- Configuration multi rangée pouvant comporter jusqu'à 31 modules .

- Possibilité d'émission et de réception pour l'échange direct de données [?].

1.5.6 Avantages des API

Les automates programmables industriels offrent de nombreux avantages par rapport à la technologie de logique câblée en raison de leur solution programmable, notamment :

- **Flexibilité** : Les API permettent une programmation et une reprogrammation rapides et faciles pour s'adapter aux besoins changeants des processus industriels.
- **Modularité** : Ils sont conçus avec des modules interchangeable et extensibles, ce qui facilite l'extension et la mise à niveau des systèmes.
- **Fiabilité** : Les API sont robustes et conçus pour fonctionner dans des environnements industriels difficiles, ce qui garantit une fiabilité élevée des opérations.
- **Maintenance facilitée** : La programmation centralisée des API facilite la maintenance et le dépannage, ce qui réduit les temps d'arrêt de production.
- **Diagnostic avancé** : Les API offrent des fonctionnalités de diagnostic avancées qui permettent de surveiller et d'analyser les performances du système en temps réel.
- **Sécurité** : Ils intègrent des fonctionnalités de sécurité avancées pour garantir la sécurité des opérateurs et des installations industrielles, par exemple; l'automate est conçu pour supporter les coupures d'alimentation et permet, par programme, d'assurer un fonctionnement correct lors de la ré-alimentation (reprises à froid ou à chaud) [40].
- **Intégration aisée** : Les API peuvent être facilement intégrés à d'autres systèmes de contrôle et de supervision, ce qui permet une automatisation complète des processus industriels.
- **Efficacité énergétique** : Grâce à une programmation précise, les API contribuent à optimiser l'utilisation des ressources et à réduire la consommation d'énergie.
- **Adaptabilité** : Ils peuvent être configurés pour fonctionner avec une grande variété de capteurs, actionneurs et équipements industriels, ce qui les rend adaptés

à différents types d'applications.

- **Caractéristique**

- Robuste : résistant à des conditions de contrainte.
- Réactive : sensible aux signaux fournis par les capteurs
- Facile à entretenir : remplacement facile des modules et redémarrage rapide
- Fiable [29], [12].

1.5.7 Paramétrage de connexion via Ethernet et Profibus

1. Connexion Ethernet

Il existe 02 types de câbles Ethernet

Câble croisé : permet une connexion directe entre l'automate S7-300 et un PC sans passer par un équipement réseau intermédiaire.

Câble droit : nécessite l'utilisation d'un hub, switch ou routeur pour relier l'automate au PC ou au réseau.

Utilisation : La connexion Ethernet est souvent utilisée pour la programmation, la supervision via SCADA, ou la communication avec d'autres systèmes via TCP/IP.

Configuration : l'adresse IP et les paramètres réseau sont configurés par le biais du logiciel STEP 7 (TIA Portal ou Classic). Cette configuration permet la communication et le transfert de données entre l'automate et le PC [15].

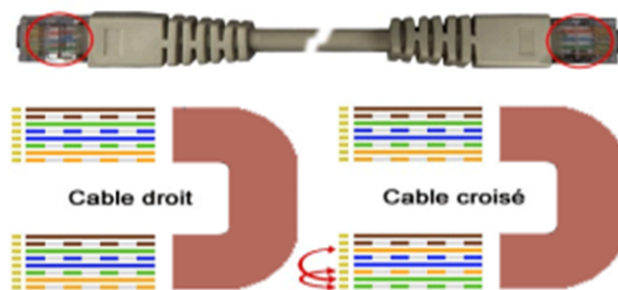


Figure 1.9: Câble Ethernet croisé et droit [21]

2. Interface Profibus

Le CPU S7-300 dispose d'une interface Profibus DP (Distributed Peripherals) permettant la connexion à un réseau Profibus. Cette interface utilise un câble spécifique (souvent à base de RS-485) pour la communication industrielle rapide et fiable. Il utilise un câble blindé avec des connecteurs spécifiques qui permet la connexion en maître/esclave sur le réseau Profibus DP jusqu'à 12 Mbit/s.

Configuration du réseau Profibus : chaque appareil (automate, capteur, actionneur) reçoit une adresse Profibus unique.

La configuration est réalisée dans STEP 7, où l'on définit le réseau, les adresses, et les paramètres de communication.

Le CPU peut fonctionner en mode maître ou esclave DP[35].

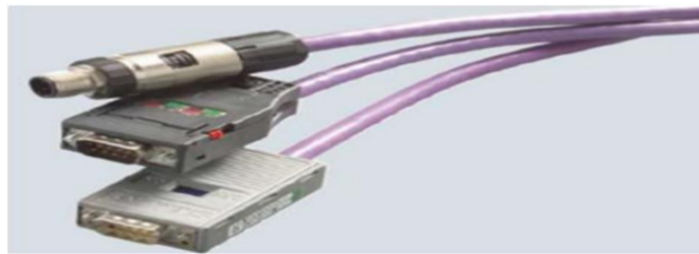


Figure 1.10: Câble Profibus [34]

1.5.8 Description de l'API utilisé : S7-300

L'API S7-300 fait référence aux interfaces de programmation et de communication disponibles pour l'API SIMATIC S7-300 de Siemens, un système d'automatisation modulaire couramment employé dans le domaine du contrôle industriel. L'API offre aux développeurs la possibilité de communiquer avec l'automate pour le transfert de données, le contrôle à distance et l'intégration avec les systèmes SCADA/MES.

1. **Introduction** : Le S7-300 fait partie de la famille SIMATIC S7 de Siemens et a été introduit dans les années 1990. Il s'agit d'un automate modulaire conçu pour les applications industrielles de moyenne et grande taille.

2. **Applications visées** : Tâches d'automatisation complexes telles que celles rencontrées dans la fabrication, les industries de process et les projets d'infrastructure.
3. **Évolutivité** : Très modulaire, il permet aux utilisateurs d'ajouter ou de retirer des modules (par exemple, CPU, E/S, modules de communication) en fonction des besoins.
4. **Programmation** : Utilise STEP 7 (TIA Portal ou Classic) avec des langages de programmation tels que la logique Ladder (LAD), le Function Block Diagram (FBD) et le Structured Text (ST) [37].



Figure 1.11: API S7-300 [38]

1.6 Conclusion

Ce chapitre parle de la régulation industrielle. Il explique ses principes fondamentaux, comment elle s'applique dans les systèmes hydrauliques et comment elle s'intègre aux nouvelles technologies de l'Industrie 4.0. La régulation est essentielle pour améliorer les processus industriels. Elle garantit la stabilité, la précision et l'efficacité énergétique.

L'étude des systèmes hydrauliques, surtout des réservoirs, a montré qu'il est important de bien réguler pour garder des variables importantes comme le niveau, la pression et le débit. L'arrivée de l'IoT, de l'IA et des jumeaux numériques permet maintenant d'avoir des systèmes plus intelligents, qui s'autorégulent et font de la maintenance prédictive.

Enfin, la présentation du prototype pédagogique basé sur l'API S7-300 a montré qu'il faut combiner la théorie et la pratique pour former les futurs ingénieurs en automatisme. Les défis de la cyber-sécurité et la complexité des systèmes multivariables restent à relever, mais la technologie progresse et offre de meilleures solutions.

Ce chapitre établit les bases pour mieux comprendre les enjeux actuels et futurs de la régulation industrielle et prépare la suite de l'étude.

Dans le chapitre suivant, nous allons détailler tous les concepts de la régulations en commençant par les méthodes utilisées pour paramétrer les régulateurs PID suivant le processus utilisés. Nous allons aussi voir en général les modèles mathématiques des trois process qui se trouvent au niveau de prototype réel à savoir : la régulation du niveau dans un réservoir, ainsi que la régulation de débit et en fin de température. Ce chapitre sera couronné par l'utilisation de l'objet technologique PID du S7-300, utilisé comme régulateur de notre process, en montrant toutes étapes suivies pour l'intégrer dans notre prototype.

Chapter 2

Chapitre 2 : Fondement de la Régulation Industrielle

Part I

Concept de La Régulation Industrielle et son utilisation

2.1 Introduction

La régulation industrielle est une discipline essentielle dans le domaine de l'automatisation et du contrôle des processus industriels. Elle permet de maintenir certaines variables physiques (telles que la température, la pression, le débit ou la vitesse) à des valeurs spécifiques appelées consignes. Ce processus garantit un fonctionnement optimal,

stable et sécurisé des systèmes industriels . La régulation industrielle consiste à contrôler automatiquement les valeurs de consignes malgré les perturbations externes ou internes. Elle repose sur des systèmes de contrôle en boucle fermée ou en boucle ouverte .

2.2 Définition et Objectifs de la Régulation Industrielle

2.2.1 Qu'est-ce que la Régulation Industrielle ?

La régulation industrielle consiste à contrôler automatiquement les paramètres d'un système industriel afin qu'ils restent proches des valeurs souhaitées (consignes) malgré les perturbations externes ou internes. Elle repose sur des systèmes de contrôle en boucle fermée ou en boucle ouverte [43].

2.2.2 Critères de performance de la Régulation

Les principaux objectifs de la régulation industrielle sont :

- **Stabilité** : Assurer que le système reste stable même en présence de perturbations.
- **Précision** : Minimiser l'écart entre la valeur mesurée $y(t)$ et la consigne $r(t)$, défini par :

$$e(t) = r(t) - y(t), \quad (2.1)$$

où $e(t)$ est l'erreur instantanée.

- **Rapidité** : Réduire le temps de réponse face aux variations.
- **Robustesse** : Maintenir les performances malgré les changements dans les conditions opérationnelles [42].

2.3 Composants d'un Système de Régulation

Un système de régulation industrielle est composé de plusieurs éléments interconnectés :

2.3.1 Capteurs

Les capteurs mesurent les variables physiques du système (température, pression, niveau, etc.) et transmettent ces informations sous forme de signaux électriques ou numériques .

2.3.2 Actionneurs

Les actionneurs agissent sur le système pour modifier les variables contrôlées. Exemples : Moteurs, vannes, pompes .

2.3.3 Contrôleur

Le contrôleur est le cœur du système de régulation. Il traite les signaux reçus des capteurs, compare les valeurs mesurées avec la consigne, et génère des signaux de commande pour les actionneurs [42].

2.3.4 Boucles de Régulation

2.3.4.1 Boucle fermée

On dit "Boucle fermée" lorsqu'on la valeur à régler doit être mesurée par le capteur et revenir en information à l'entrée du régulateur.

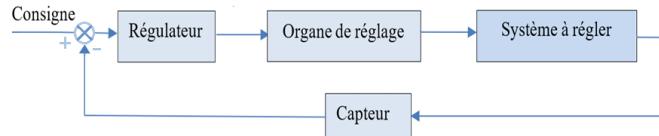


Figure 2.1: Régulation en boucle fermée [6]

2.3.4.2 Boucle ouverte

On dit "Boucle ouverte" lorsqu'on ne mesure pas la valeur sur laquelle on agit. Le régulateur ne reçoit aucune information du système réglé

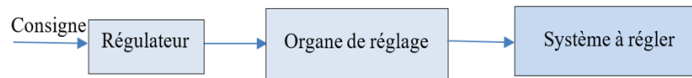


Figure 2.2: Régulation en boucle ouverte [6]

2.4 Types de Régulation

2.4.1 Régulateur Tout ou Rien

Un régulateur génère la grandeur de commande en fonction de l'écart. Le cas le plus simple est celui où l'action se fait en considérant uniquement le signe de l'écart [2]:

$$U = \begin{cases} A & \text{si } e > 0, \\ -A & \text{si } e \leq 0. \end{cases}$$

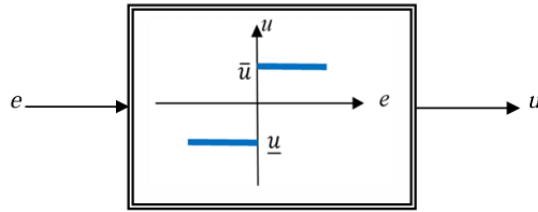


Figure 2.3: Régulation Tout ou Rien

2.4.2 Régulateur Tout ou Rien avec Seuil

Il fournit une grandeur de commande nulle lorsque l'écart est nul dans un intervalle comprenant l'origine.

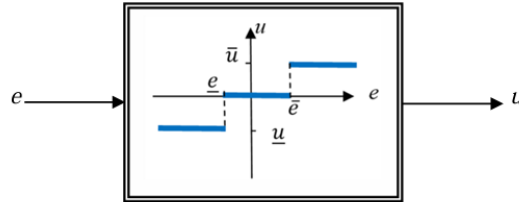


Figure 2.4: Régulation Tout ou Rien avec Seuil

2.4.3 Régulation PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé)

Un régulateur PID (Proportionnel-Intégral-Dérivé) est un correcteur à rétroaction continue qui ajuste sa sortie en combinant trois actions : la composante proportionnelle, qui réagit instantanément à l'erreur entre la consigne et la mesure ; la composante intégrale, qui cumule les écarts passés pour éliminer toute erreur résiduelle à l'état stable ; et la composante dérivée, qui anticipe l'évolution de l'erreur pour amortir les variations brusques et limiter les oscillations. En modulant respectivement l'amplitude de ces trois termes au moyen de gains ajustables (K_p , K_i et K_d), le PID permet d'obtenir une réponse rapide, précise et stable face aux perturbations et aux changements de consigne.

Paramètres importants dans la Régulation PID

Dans la régulation PID, les paramètres importants sont :

- **Le temps de réponse (Tr):** temps que doit mettre le système pour atteindre une consigne.
- **Le dépassement (D):** c'est la valeur de dépassement au-dessus de la consigne.
- **La marge d'erreur :** c'est la différence entre la consigne et la valeur mesurée [5].

Les paramètres propres du PID sont :

- **Proportionnelle (P) :**

La loi de commande est :

$$u_P(t) = K_p \cdot e(t). \quad (2.2)$$

avec K_p : gain proportionnel

Le régulateur proportionnel augmente la rapidité et réduit l'erreur statique , mais un fort gain diverge le système et pour les majorités des cas n'élimine pas définitivement l'erreur

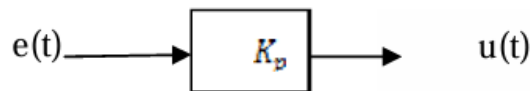


Figure 2.5: Régulateur proportionnel

- **Action Intégrale (I) :**

La loi de commande est :

$$u_I(t) = K_i \int_0^t e(\tau) d\tau. \quad (2.3)$$

Le régulateur intégral élimine l'erreur statique mais il y a risque de dépassement et d'instabilité mais diminue le temps de réponse.

- **Action Dérivée (D) :**

La loi de commande est :

$$u_D(t) = K_d \frac{de(t)}{dt}. \quad (2.4)$$

Le régulateur dérivé réduit le dépassement et les oscillations mais il est difficile à paramétrer

- **Action proportionnelle Intégrale (PI) :**

La loi de commande est :

$$u(t) = u_P(t) + u_I(t) \quad (2.5)$$

Le régulateur PI augmente la rapidité et supprime l'erreur mais il y a risque de dépassement et d'oscillations si ces paramètres sont mal choisis.

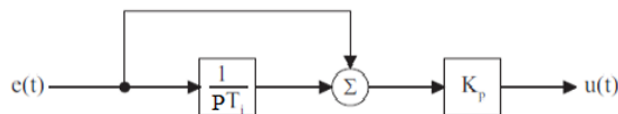


Figure 2.6: Schéma fonctionnel du régulateur proportionnel-intégrale (PI)

- **Action proportionnelle-Intégrale-dérivée (PID) :** la loi de commande est :

$$u(t) = u_P(t) + u_I(t) + u_D(t). \quad (2.6)$$

la régulation PID est rapide, précise, stable et sans dépassement mais le réglage est

plus complexe

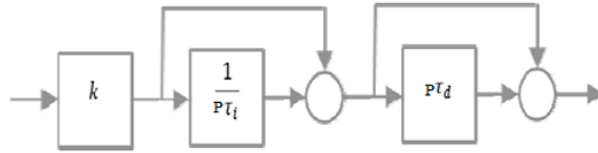


Figure 2.7: Schéma fonctionnel du régulateur proportionnel-Intégrale-dérivée (PID)

2.4.4 Régulation basées sur l'IA

- a) Réseaux de Neurones Artificiels (ANN)

est un système dont la conception schématiquement inspirée du fonctionnement des neurones biologiques.

- b) Algorithmes Génétiques

L'algorithme génétique est une technique qui s'inspire des principes de l'évolution, tels qu'ils ont été formulés par le naturaliste britannique Charles Darwin dans son ouvrage *The Origin of Species*, publié au XIXe siècle.

- c) Régulation floue (fuzzy logic control)

La logique floue est une extension de la logique booléenne créée par Lotfi Zadeh en 1965, en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous [5].

2.4.5 Régulation Multivariable

2.4.5.1 Complexité des Systèmes Multivariables

Dans les systèmes multivariables, plusieurs variables d'entrée et de sortie interagissent entre elles. La matrice de transfert $G(s)$ décrit les relations entre les entrées $U(s)$ et les sorties $Y(s)$:

$$Y(s) = G(s) \cdot U(s), \quad (2.7)$$

où $G(s)$ est une matrice de dimension $n \times m$, avec n sorties et m entrées [25][31].

2.4.5.2 Approches Spécifiques

Pour gérer les interactions entre variables, plusieurs approches peuvent être utilisées :

- **Découplage** : Technique permettant de rendre les variables indépendantes les unes des autres.

- **Commande Prédictive**

Utilisation de modèles mathématiques pour anticiper les interactions entre variables [31], [41].

2.5 Choix et dimensionnement des Régulateurs

2.5.1 Méthodes de réglage d'un correcteur PID

Pour trouver les coefficients des correcteurs P , I , D , il existe plusieurs méthodes :

- Réglage Manuel (essai-erreur)
- Méthode de Placement de Pôles
- Méthode d'Auto-tuning
- Méthode de Ziegler-Nichols (réponse indicielle)
- Méthode de Ziegler-Nichols (point critique)

2.5.2 Méthode pratique de Ziegler-Nichols pour le réglage d'un correcteur PID

En 1942, Ziegler et Nichols ont proposé deux approches heuristiques basées sur leurs régulateurs P , PI , et PID . La première méthode nécessite l'enregistrement de la

réponse indicielle en boucle ouverte, tandis que la deuxième demande d'amener le système à sa limite de stabilité. Ces systèmes possèdent souvent un retard pur et/ou plusieurs constantes de temps. On les rencontre surtout dans les processus physico-chimiques tels que les réglages de température, de niveau, de pression, etc.

La méthode développée par Ziegler et Nichols n'est utilisable que si le système étudié supporte les dépassements. Elle consiste à augmenter progressivement le gain d'un correcteur proportionnel pur jusqu'à l'obtention de l'oscillation. À partir de ces valeurs, Ziegler et Nichols proposent des valeurs permettant le réglage des correcteurs P , PI , et PID .

On augmente progressivement le gain K_p du correcteur proportionnel agissant seul jusqu'à l'obtention de la juste oscillation de la boucle. On relève le gain limite (K_{pc}) conduisant au pompage de la boucle et la période des oscillations T_c correspondant à ce fonctionnement à partir de n'importe quel point d'observation (sortie du régulateur, sortie du procédé...) [41].

2.5.2.1 Extrait du régulateur PID par la méthode de Ziegler-Nichols (point critique)

Ziegler & Nichols proposent de calculer les paramètres du régulateur choisi à l'aide des recommandations suivantes :

Le gain du régulateur générant ce régime, dit gain critique, et la période rencontrée sous le nom de période critique, sont mesurés. On peut calculer les paramètres du régulateur choisi à l'aide du tableau ci-dessous :

Tableau des paramètres pour les différents types de régulateurs PID

Type	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{pc}$	∞	0
PI	$0.45K_{pc}$	$1/1.2T_c$	0
PID	$0.6K_{pc}$	$0.5T_c$	$0.125T_c$

Table 2.1: Paramètres du régulateur PID

Dans l'industrie actuelle (comme l'industrie 4.0 par exemple), nous utilisons de plus en plus l'organe de commande qui est l'API qui nous permet d'obtenir une régulation numérique qui nous facilite la régulation des processus très complexe. Cet organe est très fiable, robuste et simple à utiliser. Il comporte le régulateur PID qui est un objet technologie introduit au niveau de l'API. C'est dans cet objectif qui sera utilisé pour réguler notre prototype réel.

2.6 Conclusion

Cette partie nous a permis de comprendre les bases de la régulation industrielle, ses composants, ces types et son importance dans les applications modernes. Ces connaissances serviront de fondement pour les parties suivantes, où nous appliquerons ces principes à un système concret .

Part II

Exemples sur certaines variables physiques

Une régulation efficace nécessite une bonne connaissance du système à contrôler. Il est donc important de connaître ses variables ainsi que, sa fonction de transfert ou son modèle mathématique.

2.1 Régulation de Débit

Le débit volumique est défini comme le volume d'un fluide qui passe ou s'écoule par unité de temps, généralement désigné par le symbole Q . Son unité dans le Système International d'unités est le m^3/s .

$$Q_v = \frac{dV}{dt} \quad (2.8)$$

où :

- Q_v : Volume de fluide par unité de temps qui traverse une section droite quelconque de la conduite (m^3/s),

- dV : Volume élémentaire en (m^3) traversant une section S pendant un intervalle de temps dt ,

- dt : Intervalle de temps en secondes (s).

2.1.1 Variation de Débit entre Deux Points (Avant et Après la Vanne)

L'équation de Bernoulli stipule que pour un fluide non visqueux et incompressible et laminaire en écoulement stationnaire, la somme des pressions, des énergies potentielles et des énergies cinétiques par unité de volume est constante en tout point :

$$P_1 + \rho v_1 + \frac{1}{2}\rho g h_1 = P_2 + \rho v_2 + \frac{1}{2}\rho g h_2 \quad (2.9)$$

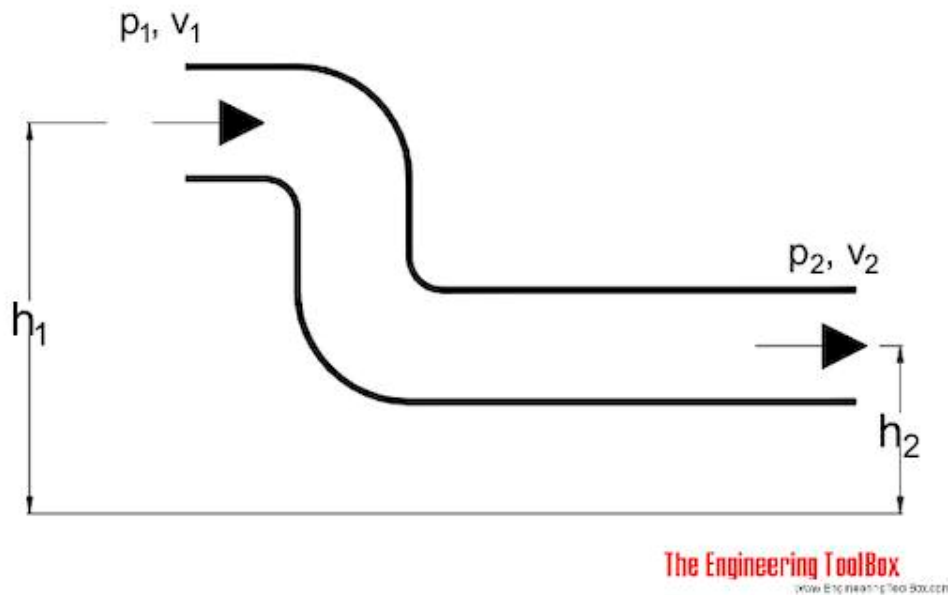


Figure 2.8: Relation de bernoulli entre deux surfaces [13]

où :

- P_1, P_2 : Pression,
- v_1, v_2 : Vitesse,
- h_1, h_2 : Hauteur.

Les masses volumiques ρ_1 et ρ_2 sont identiques tant qu'il y a le même liquide (l'eau).

À partir de l'équation de continuité :

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2, \quad (2.10)$$

Où

- Q : Débit,
- A_1, A_2 : Surfaces de sections avant et après la vanne,
- V_1, V_2 : Vitesses de liquide avant et après la vanne.

Si on suppose que les surfaces de sections sont égales, alors $V_1 = V_2$:

$$Q = A_1V_1 = A_2V_2. \quad (2.11)$$

La vitesse est donnée par :

$$V = \frac{Q}{A}. \quad (2.12)$$

L'équation de Bernoulli devient :

$$P_1 + 1/2\rho gh_1 = P_2 + 1/2\rho gh_2, \quad (2.13)$$

$$(P_1 - P_2) = \rho g(h_2 - h_1) = -\rho g(h_1 - h_2). \quad (2.14)$$

Ainsi

$$\Delta P = (P_1 - P_2) = -\rho\Delta h. \quad (2.15)$$

À partir de l'équation de Darcy-Weisbach, on retire la vitesse :

$$(2.16)$$

Donc

$$V = \sqrt{\frac{2D\Delta P}{\rho fL}}. \quad (2.17)$$

Et à partir de l'équation de continuité :

$$Q = AV = A\sqrt{\frac{2D\Delta P}{\rho fL}}. \quad (2.18)$$

$$Q = K\sqrt{\Delta P}, \quad (2.19)$$

Où K est une constante :

$$K = A\sqrt{\frac{2D}{\rho fL}}. \quad (2.20)$$

2.1.2 Fonction Dynamique de la Vanne

La relation entre le débit et l'ouverture de la vanne est donnée par :

$$Q = C_v u \sqrt{\Delta P}, \quad (2.21)$$

Où

- u : Ouverture relative de la vanne,
- C_v : Coefficient de débit caractéristique de la vanne.

La relation entre l'entrée relative et l'entrée en position est :

$$U_{\text{eff}}(s) = \frac{1}{\tau_v s} U(s) \quad (2.22)$$

Cette équation modélise une dynamique intégrative entre la commande d'entrée (tension) et la position réelle de la vanne.

$U(s)$: l'entrée en position .

En remplaçant dans Q :

$$Q = C_v \Delta P U_{\text{eff}}(s). \quad (2.23)$$

$$\frac{U(s)}{Q(s)} = \frac{C_v \sqrt{\Delta P}}{\tau_v s + 1}. \quad (2.24)$$

La fonction finale est :

$$G(s) = \frac{K}{\tau_v s + 1}, \quad (2.25)$$

Où $K = C_v \sqrt{\Delta P}$.

La fonction finale est une fonction de transfert du premier ordre, valide si on modélise une dynamique d'ordre 1 (non un intégrateur pondéré) [32][45].

2.2 Régulation de niveau

Introduction

Dans ce document, nous dérivons les fonctions de transfert pour un système de réservoir impliquant la continuité du débit et la régulation de pression. Les équations sont analysées en utilisant des principes physiques tels que la loi de continuité et l'équation de Darcy-Weisbach.

Équation de Continuité et Niveau de Liquide

La loi de continuité est donnée par :

$$Q = A \cdot v = \text{constante}, \quad (2.26)$$

Où

- Q : Débit volumique (en m^3/s),
- A : Section transversale du tuyau (en m^2),
- v : Vitesse d'écoulement du fluide (en m/s).

Le volume $V(t)$ dans le réservoir est défini comme :

$$V(t) = H(t) \cdot S, \quad (2.27)$$

Où

- $H(t)$: Hauteur du liquide dans le réservoir,
- S : Surface de base du réservoir.

En régime dynamique, la variation du volume est donnée par :

$$\frac{dV(t)}{dt} = Q_{\text{in}}(t) - Q_{\text{out}}(t). \quad (2.28)$$

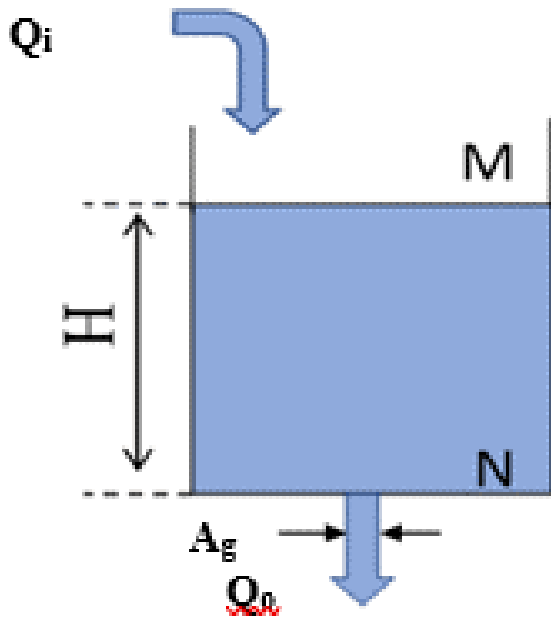


Figure 2.9: Remplissage du réservoir avec un débit entrant et sortant [1]

En remplaçant $V(t) = H(t) \cdot S$, on obtient :

$$\frac{dH(t)}{dt} = \frac{1}{S} (Q_{in}(t) - Q_{out}(t)). \quad (2.29)$$

Supposons que le débit sortant dépend de la hauteur selon :

$$Q_{out}(t) = K_s \cdot H(t), \quad (2.30)$$

Où K_s est un coefficient lié à la sortie.

L'équation devient alors :

$$\frac{dH(t)}{dt} = \frac{1}{S} (Q_{in}(t) - K_s \cdot H(t)). \quad (2.31)$$

En appliquant la transformée de Laplace, on obtient :

$$p \cdot H(p) = \frac{1}{S} (Q_{in}(p) - K_s \cdot H(p)). \quad (2.32)$$

En réorganisant, on obtient la fonction de transfert :

$$\frac{H(p)}{Q_{\text{in}}(p)} = \frac{1}{S \cdot p + K_s}. \quad (2.33)$$

C'est une fonction de transfert de type premier ordre, où :

- S : Section du réservoir,
- K_s : Coefficient lié à la sortie,
- $H(p)$: Sortie (niveau),
- $Q_{\text{in}}(p)$: Entrée (débit)[13][1]

2.3 Régulation de Pression

La pression est définie comme :

$$P = \frac{F}{S}, \quad (2.34)$$

Où

- P : Pression,
- F : Force,
- S : Surface.

Pour modéliser la variation de pression, nous utilisons l'équation de Darcy-Weisbach

:

$$\Delta P = \rho \cdot f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2}, \quad (2.35)$$

Où

- ΔP : Variation de pression (en Pascals),
- ρ : Densité du liquide (en kg/m^3),
- f : Coefficient de friction,
- L : Longueur de la conduite (en mètres),
- D : Diamètre de la conduite (en mètres),

- v : Vitesse de l'écoulement (en m/s).

À partir de la loi de continuité, la vitesse v peut être exprimée comme :

$$v = \frac{Q}{A}. \quad (2.36)$$

En substituant v dans l'équation de Darcy-Weisbach, on obtient :

$$\Delta P = \rho \cdot f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{\left(\frac{Q}{A}\right)^2}{2}. \quad (2.37)$$

En posant $K = \rho \cdot f \cdot \frac{L}{D} / \frac{A^2}{2}$, l'équation devient :

$$\Delta P = K \cdot Q^2. \quad (2.38)$$

En appliquant la transformée de Laplace, on a :

$$P(p) = K \cdot Q^2(p). \quad (2.39)$$

Linéarisation

Nous utilisons la série de Taylor pour linéariser le système autour d'un point Q_0 . La dérivée de ΔP par rapport à Q est :

$$\frac{d(\Delta P)}{dQ} = 2 \cdot K \cdot Q_0. \quad (2.40)$$

Autour du point Q_0 , l'approximation linéaire est donnée par :

$$\Delta P = \Delta P_0 + \frac{d(\Delta P)}{dQ} \cdot (Q - Q_0). \quad (2.41)$$

En substituant $\Delta P_0 = K \cdot Q_0^2$, on obtient :

$$\Delta P = K \cdot Q_0^2 + 2 \cdot K \cdot Q_0 \cdot (Q - Q_0). \quad (2.42)$$

En simplifiant, on trouve :

$$\Delta P - \Delta P_0 = 2 \cdot K \cdot Q_0 \cdot Q_1, \quad (2.43)$$

Où $Q_1 = Q - Q_0$.

La fonction de transfert linéaire est donc :

$$\Delta P = G(p) \cdot Q_1, \quad \text{avec } G(p) = 2 \cdot K \cdot Q_0. \quad (2.44)$$

C'est une fonction de transfert de type premier ordre, où :

- ΔP : Entrée,
- Q_0 : Sortie [45]

2.4 Régulation de température

La température, en physique et en chimie, est une forme d'énergie qui est associée au mouvement des atomes, des molécules ou de toute particule entrant dans la composition de la matière. La chaleur peut être générée par :

- Les réactions chimiques, comme la combustion,
- Les réactions nucléaires, telles que la fusion nucléaire qui se produit dans le Soleil,
- Le rayonnement électromagnétique, comme c'est le cas avec les plaques de cuisson à induction électromagnétique,
- Le mouvement, par exemple le frottement entre les pièces des machines.

Le premier principe de la thermodynamique stipule que l'augmentation de l'énergie interne est égale à la quantité nette de chaleur q (en J/kg) transférée au système, moins le travail net effectué par le système w (en J/kg).

Ce principe est une forme de la loi de conservation de l'énergie. Pour un processus infinitésimal, on a :

$$\Delta U = U_2 - U_1 = q - w \quad (2.45)$$

Avec

- Transfert de chaleur q : énergie apportée ou retirée sous forme de chaleur,
- Travail w : énergie échangée sous forme de travail.

Le système étudié est un réservoir d'eau chauffée par une résistance, donc :

- q : énergie apportée au système (par la résistance électrique),
- w : énergie perdue par le système.

On pose $q = P(t)$, la puissance thermique apportée par la résistance, et w comme l'énergie transférée à un fluide en mouvement (air ou liquide). Selon la loi de Fourier, cette énergie est donnée par :

$$W = hA(T - T_{\text{amb}}) \quad (2.46)$$

Où

- $T(t)$: température à l'instant t (en °C),
- T_{amb} : température ambiante (en °C),
- h : coefficient de transfert thermique (en $\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{°C}$),
- A : surface d'échange thermique effective.

La puissance thermique absorbée ou libérée par le système pour faire changer sa température est :

$$\frac{dU}{dt} = C \frac{dT(t)}{dt} \quad (2.47)$$

En remplaçant dans la première loi de la thermodynamique :

$$C \frac{dT(t)}{dt} = P(t) - hA(T(t) - T_{\text{amb}}) \quad (2.48)$$

Après transformation de Laplace (avec $k = hA$), l'expression devient :

$$(Cp + K)T(s) = P(p) + \frac{K}{p}T_{\text{amb}} \quad (2.49)$$

Pour simplifier le système, on pose $T_{\text{amb}} = 0$ (modélisation autour d'une température relative), alors la fonction de transfert devient :

$$T(p) = \frac{P(p)}{Cp + K} \quad (2.50)$$

Donc

$$G(s) = \frac{T(p)}{P(p)} = \frac{1}{Cp + K} \quad (2.51)$$

Où

- $\tau = \frac{C}{k}$ est la constante de temps du système (en secondes),
- $\frac{1}{K}$ est le gain statique (en °C/W) [11].

Conclusion

Ce chapitre nous a permis de donner un aperçu détaillé sur la régulation automatique. Nous avons montré que la régulation permet de maintenir une grandeur physique

(niveau, pression, débit, température...) à une valeur désirée malgré les perturbations. La régulation de niveau agit sur le remplissage d'un réservoir pour conserver une hauteur constante, souvent modélisée comme un intégrateur ou un système du premier ordre. La régulation de pression, influencée par la compressibilité du fluide, suit généralement une dynamique du premier ordre. La régulation de débit, plus rapide, repose sur une relation directe entre l'ouverture de la vanne et le flux. Quant à la régulation de température, elle présente une inertie thermique notable et un retard de réponse. Ces bases théoriques serviront d'appui pour l'analyse et la mise en œuvre de notre Système, qui est une station pédagogique de remplissage de réservoir automatisé et se trouve dans le laboratoire pédagogique des API.

Chapter 3

Chapitre 3 : Application de la régulation sur le prototype réel

3.1 Description du prototype réel

3.1.1 Architecture et commande d'un système hydraulique

Il s'agit d'un système hydraulique composé de trois circuits d'eau. Chaque circuit est conçu pour réguler un ou deux paramètres physiques suivants :

- Niveau,
- Débit,
- Pression,
- Température.

Le figures 1 représenté une photo réel de notre prototype.

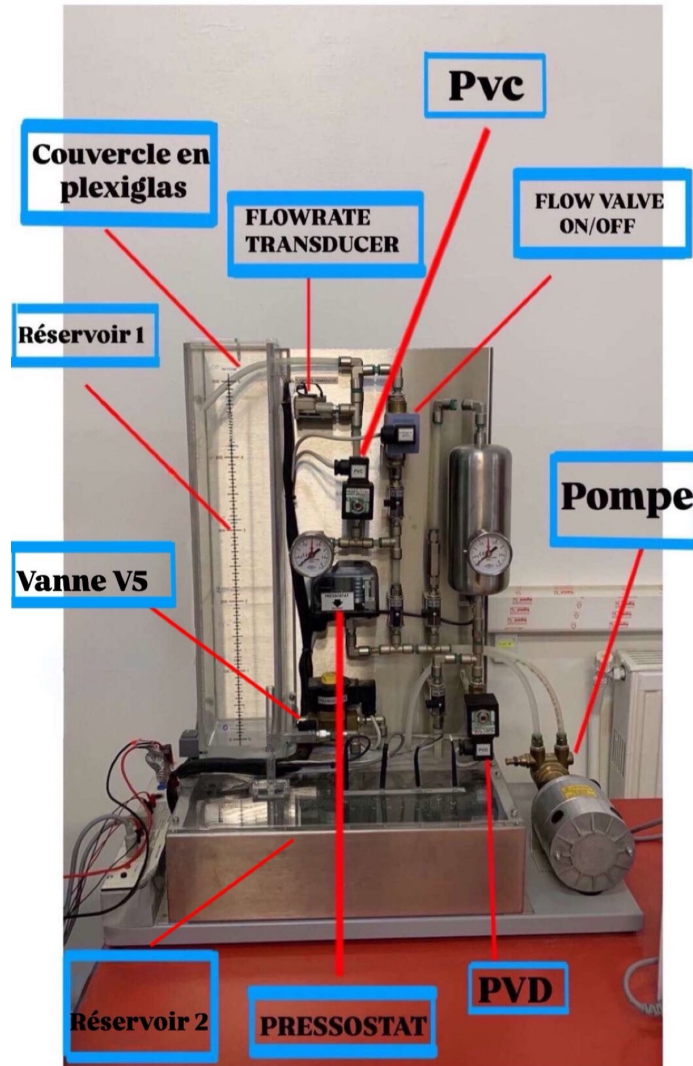


Figure 3.1: Unité externe mod. FLTP-U/EV [14]

Le système comprend :

- **Pompe** : alimentée en 12 V permettant de faire circuler l'eau dans chacun des circuits.
- **6 vannes** : utilisées pour isoler les circuits lors des phases de maintenance ou de réglage qui sont identiques à la Vanne V5 représenté dans la figure.
- **2 réservoirs** : le réservoir 2, d'un volume inconnu, est installé pour stocker l'eau. Le réservoir 1 (réservoir principal) de volume 5l va nous permettre de faire princi-

palemnt la régulation de niveau et ainsi contribuer la régulation d'autre grandeurs.

- **Vanne proportionnelle** : (solénoïde) permet un contrôle dans les applications où le débit ou la pression de sortie varient ou sont basés sur un point de consigne dynamique. La vanne influe sur les paramètres clés du processus au sein d'un système, tels que le niveau, la pression et la température.



Figure 3.2: Vanne proportionnelle PVC [14]

- **Capteurs** : Il existe plusieurs capteurs, parmi eux :

* **Capteur de débit (débitmètre)** : est un capteur analogique de valeur maximale 6l/mn délivrant une tension proportionnelle de 0 à 10V.

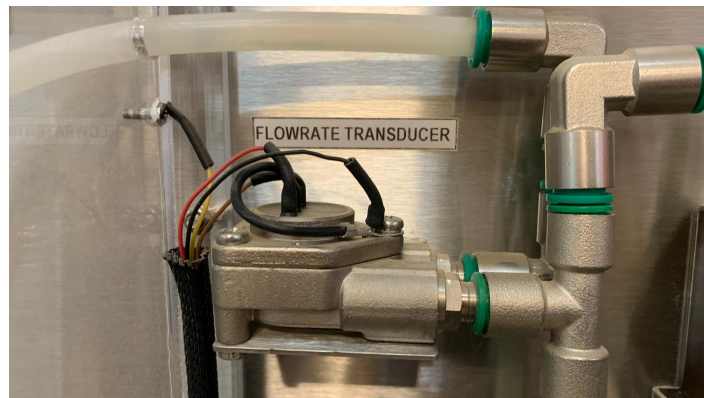


Figure 3.3: Capteur de débit [14]

* **Capteur de pression** : est aussi un capteur analogique de valeur maximale 1,5 Bar délivrant une tension proportionnelle de 0 à 10V.



Figure 3.4: Capteur de pression [14]

* **Pressostat** : Dans notre cas, ce dispositif sert à protéger les installations en activant ou coupant des équipements comme la pompe lorsque la pression atteint un seuil prédéfini de 3 bar.



Figure 3.5: Pressostat [14]

- **Capteur piézométrique** : est un capteur analogique de niveau. Dans notre banc d'essai, la valeur maximale à mesurer est de 50 cm délivrant une tension proportionnelle de 0 à 10V.



Figure 3.6: Capteur piézométrique [14]

Connectique du banc didactique du système (modèle FLTP-1/EV)

La figure 3.7 représente les borniers nécessaires pour alimenter les différents capteurs et actionneurs. Nous citons :

- Pompe (1) avec en tension fixe de 12V .
- Electrovanne PVC d'une tension variable de 0 à 24V.
- Electrovanne PVD d'une tension variable de 0 à 24V.
- Résistance chauffante d'une tension variable de 0 à 48V.

Il sert aussi à fournir la tensions du capteur à travers :

- Transducteur B pour la grandeur température .

- Transducteur C pour les grandeurs niveau et débit .
- Transducteur D pour la grandeur pression .



Figure 3.7: Connectique du banc didactique du système modèle FLTP-1/EV [14]

Maintenant, pour piloter notre banc d'essai, nous allons le relier à l'automate S7-300. Nous allons connecter les différents capteurs à savoir le capteur de niveau, de débit et de pression aux entrées de l'API. Ce dernier traite les signaux par ces langages et commande les différents actionneurs (les vannes et la pompe) (voir dans L'annexe). Ce fonctionnement est supervisé via un système IHM (WinCC Advanced) qui se trouve dans le progiciel TIA Portal qui permet à l'opérateur de visualiser en temps réel l'état des capteurs et actionneurs à travers des objets graphiques (bond graphes, bargraphes, alarmes). Cette IHM sera connectée à l'API par les protocoles de communication industriels Ethernet/IP. Dans ce cas, nous pouvons commander le réglage de paramètres (consignes, régulateurs PID), et l'affichage Les valeurs de capteurs à travers notre PC.

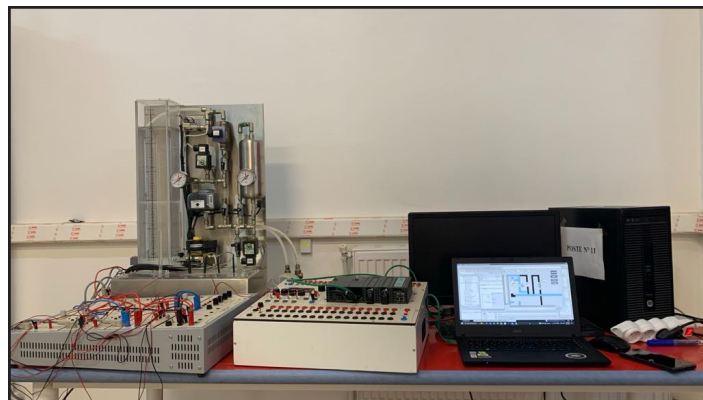


Figure 3.8: Photo réel de notre Système automatisé

3.2 Logiciel TIA Portal

3.2.1 Définition

Est la plateforme d'ingénierie développée par Siemens pour la programmation, la configuration et la supervision des systèmes d'automatisation industrielle, notamment les (API), (IHM) et les entraînements[26][33][7].

TIA Portal est l'outil de référence pour l'automatisation industrielle Siemens, alliant simplicité, puissance et intégration pour concevoir, programmer, simuler et superviser l'ensemble des installations automatisées.

3.2.2 Logiciels et modules principaux :

Dans notre projet, nous avons utilisé deux logiciels clés, à savoir :

STEP 7: pour la programmation des automate

WinCC : pour la création et la gestion des interfaces homme-machine (supervision, synoptiques, alarmes...).

Interface utilisateur : L'environnement est conçu pour être ergonomique, avec une vue projet hiérarchisée, des éditeurs graphiques pour la configuration matérielle, la programmation (en langage LADDER, FBD, SCL...), la gestion des variables, la simulation et le diagnostic[26][33][7].



Figure 3.9: Icône du logiciel TIA Portal [33]

Dans ce qui va suivre, nous allons donner les différentes étapes que nous avons suivi pour achever notre projet

3.2.3 Création d'un projet utilisant le S7-300 avec logiciel TIA Portal

Dans le cadre de la création d'un nouveau projet, il est nécessaire de cliquer sur l'option New Project . Une fois cette étape initiale réalisée, les données requises doivent être complétées.

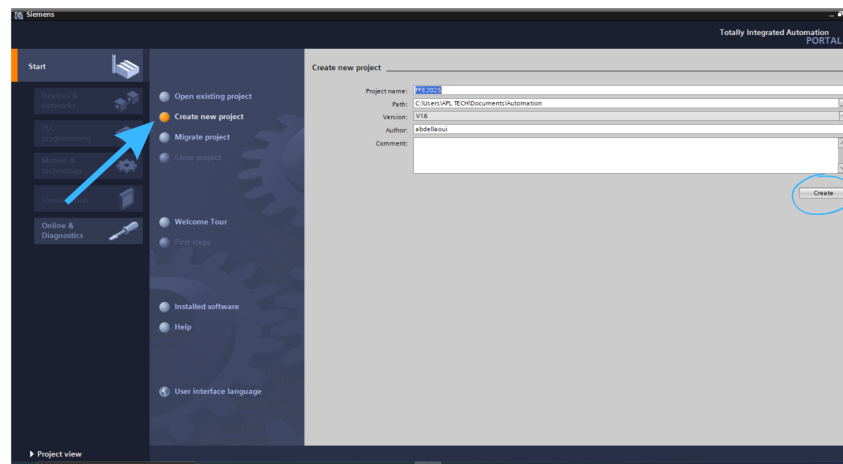


Figure 3.10: Fenêtre de création d'un nouveau projet

Une fois la configuration matérielle achevée, cette étape s'opère par le biais de l'option Écrire le programme PLC (Write PLC program), laquelle est accessible depuis la section dédiée à la programmation PLC. À ce stade du processus, la logique de contrôle est mise en œuvre afin d'assurer le fonctionnement du système automatisé selon les critères prédéfinis.

Le choix du langage dépend du type d'application, de la complexité du programme et des préférences du programmeur. Cette flexibilité rend TIA Portal adapté à divers domaines industriels. Grâce à une interface intuitive et à des outils intégrés de test, l'utilisateur peut écrire, simuler et valider ses programmes en toute simplicité avant leur transfert vers le PLC.

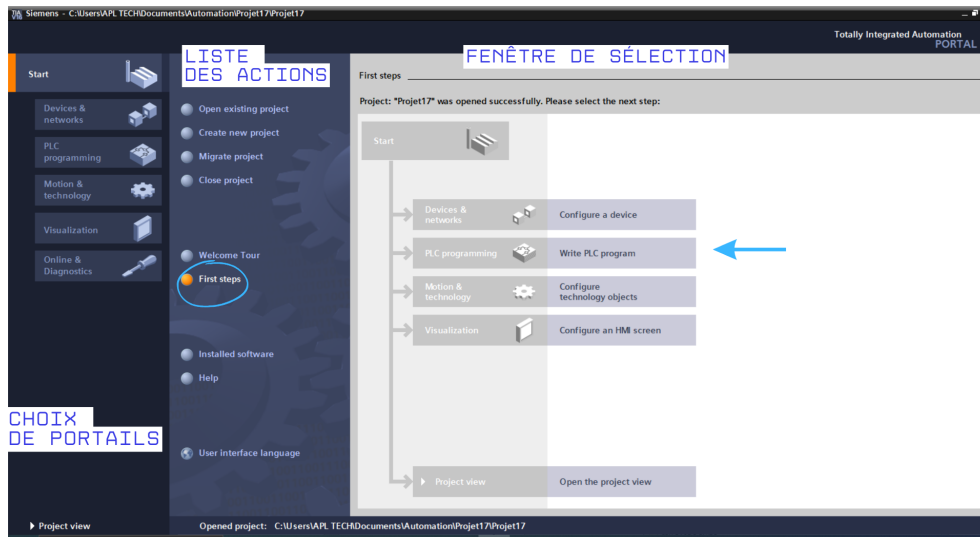


Figure 3.11: Fenêtre pour l'insertion d'un API

Notre sélection s'est portée sur le CPU Siemens 6ES7 314-6EH04-0AB0 (S7-300), un modèle reconnu pour sa robustesse et sa polyvalence dans les applications industrielles. Ce CPU est idéal pour notre PFE grâce à sa capacité à gérer des tâches d'automatisation complexes tout en offrant une intégration transparente avec TIA Portal.

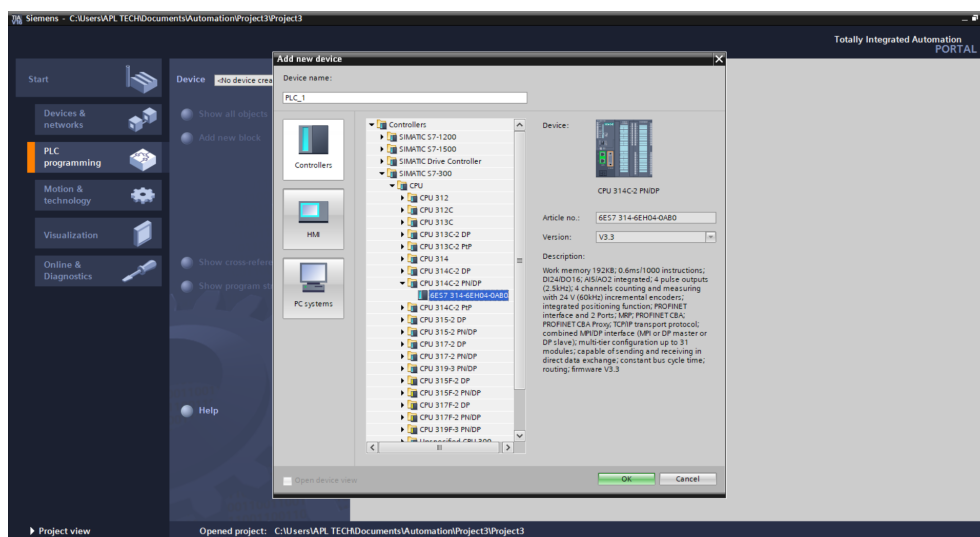


Figure 3.12: Choix de la CPU

Voici l'interface générale du projet dans le logiciel TIA Portal, un outil puissant utilisé pour la configuration, la programmation et le diagnostic de systèmes automa-

tisés. Dans cet exemple, le PLC utilisé est un S7-300, ce qui illustre comment TIA Portal facilite la gestion des ressources matérielles et logicielles nécessaires au développement d'un système automatisé.

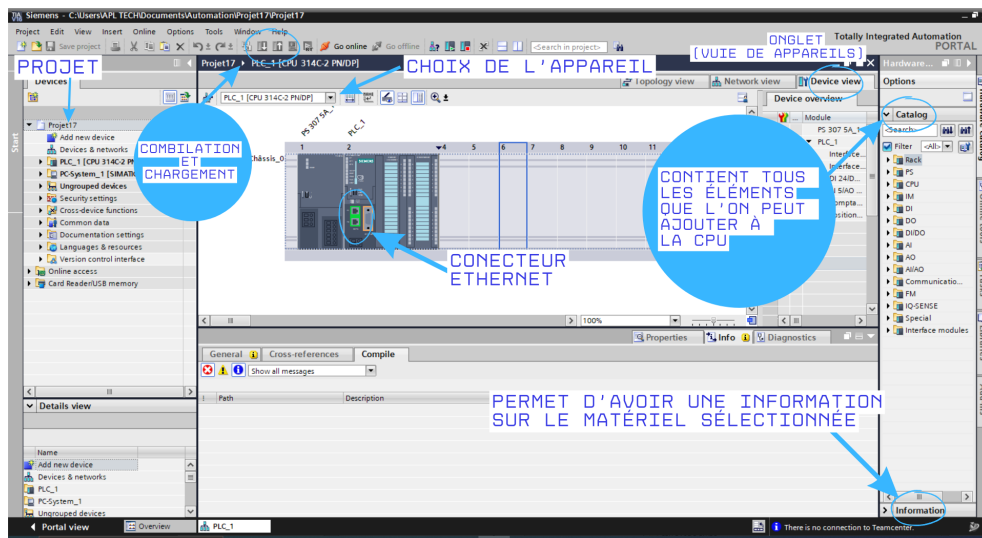


Figure 3.13: Vue principale du projet

Notre API s7-300 est notre organe de commande nécessaire pour faire la régulation industrielle en utilisant son objet technologique le PID compact. Ce dernier doit être exécuté à chaque temps d'échantillonnage fourni par OB35

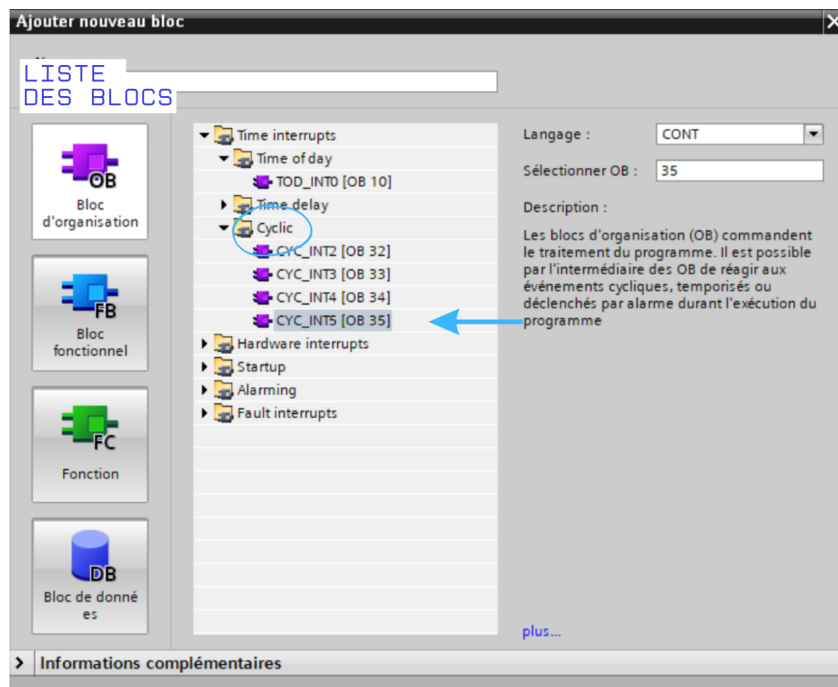


Figure 3.14: Insertion d'un bloc OB35

3.2.4 PID COMPACT

Dans le bloc PID, la valeur mesurée périphérique (valeur numérique) fournie par le capteur PVI est comparée à la consigne SP INT pour donner l'erreur ER. Cette dernière nous permet de calculer la nouvelle commande obtenue par notre régulateur PID. Pour cela, nous avons introduit les 03 paramètres de notre régulateur à savoir :

P (Proportionnelle) : définie par P SEL, agit ou amplifie l'erreur.

I (Intégrale) : activée par I SEL, intègre l'erreur dans le temps pour éliminer l'erreur résiduelle.

D (Dérivée) : activée par D SEL, réagit aux variations rapides de l'erreur pour stabiliser le système.

Vous pouvez activer ou désactiver des fonctions partielles du régulateur PID afin de l'adapter au système réglé (comme désactiver le correcteur dérivée en mettant D SEL = 0) .

Les trois signaux (LMN P, LMN I, LMN D) sont additionnés pour produire une commande (LMN). le régulateur vérifie si le (MAN ON) est actif (mode manuel). Si c'est le cas, l'utilisateur peut forcer la sortie. Sinon, la sortie automatique LMN passe par un bloc LMNLIMIT qui applique des limites minimales et maximales (LMN HLM, LMN LLM). Enfin, la valeur est convertie en pourcentage (LMN PER) via CRP OUT et envoyée à la sortie analogique vers les actionners.

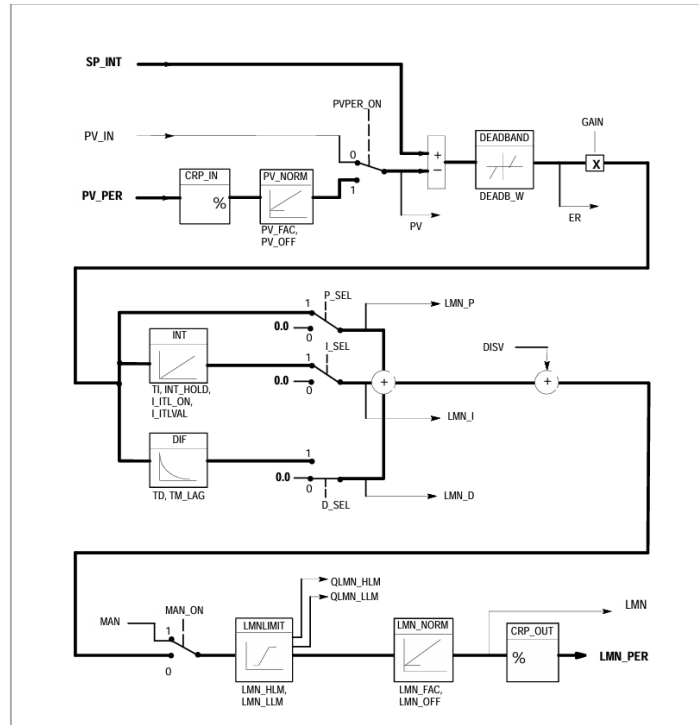


Figure 3.15: Schéma fonctionnel du PID [33]

Paramètres d'entrée CONT C

MAN ON : Activation mode manuelle ou mode automatique

P SEL : Action P est active quand cette entrée est à 1.

I SEL : Action I est active quand cette entrée est à 1.

D SEL : Action D est active quand cette entrée est à 1.

SP INT : Entrée consigne.

PV IN : Entrée capteur.

GAIN : Entrée "Coefficient du gain de l'action proportionnelle".

TI : Entrée "Temps d'intégration".

TD : Entrée "Temps de dérivation".

Paramètres de sortie CONT C

LMN : Valeur de réglage.

LMN PER : Valeur de réglage en format périphérie.

3.2.5 Traitement des valeurs analogiques

Dans la régulation ,tout repose sur la valeur mesurée fournie par le capteur qui est directement convertie par notre API pour fournir une valeur numérique (appelée périphérique). Cette valeur doit avoir un sens pour l'opérateur. Pour cela, nous devons la remettre en échelle, en d'autres termes, la rendre une valeur physique exploitable par l'opérateur.

Le bloc "Mise à l'échelle" convertit la valeur numérique en une valeur physique comprise entre Low-lim et Hi-lim en utilisant une relation linéaire.

En pratique, les automates Siemens comportent un convertisseur analogique-numérique (CAN) de 15 bits standardisé sur la plage de valeurs de 0 à 27648 pour les signaux analogiques qui correspond à une tension fournie par notre capteur comprise entre 0 à 10V. Il faut savoir que notre API peut supporter une tension aux environs de 11.85V qui correspond à une valeur numérique 32767 (valeur max pour un convertisseur de 15 bits, cela pour des raisons de protection.

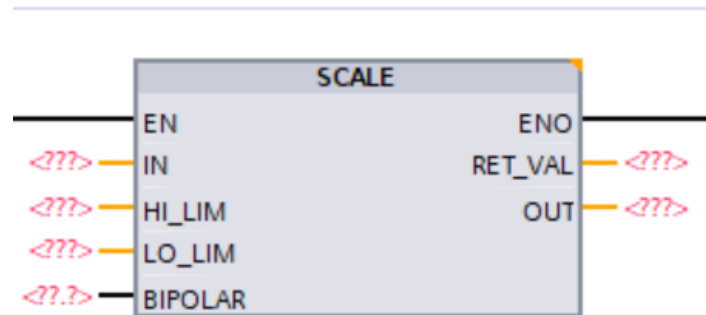


Figure 3.16: Schéma du bloc "Scale" dans TIA Portal

IN : Entrée capteur

HI LIM : Limite supérieure de capteur

LO ILM : Limite inférieure de capteur

BIPOLAR : Mise à "1", la valeur du paramètre IN est bipolaire donc la valeur OUT

varie entre -27638 et 27648. Par contre, si elle est mise à "0", la valeur du paramètre IN est unipolaire donc la valeur OUT varie entre 0 et 27648.

RET VAL : Code d'erreur

OUT : Valeur de sortie (entre LO LIM et HI LIM)

Après avoir fini la partie programmation STEP7, nous allons passer au développement de notre IHM qui nous a aidé à introduire les différents paramètres nécessaires pour la régulation et nous a facilité la visualisations des différents résultats.

3.2.6 Développement de notre IHM

3.2.6.1 Définition d'une IHM

C'est une interface utilisateur affichée sur un panneau de commande qui relie une personne à une machine, un système ou un dispositif. Bien que le terme puisse techniquement s'appliquer à tout affichage permettant à l'utilisateur d'interagir avec un dispositif, l'IHM (Interface Homme Machine) est le plus souvent utilisée dans le contexte des processus industriels qui contrôlent et surveillent les machines de production.

3.2.6.2 Création d'une vue dans l'IHM

Dans la barre d'outils de Tia Portal, nous avons choisi d'ajouter un appareil qui est dans notre cas un Système PC, comme le montre la Figure 3.17. Nous avons sélectionné "Application Simatic HMI" avec "WINCC RT Advanced".

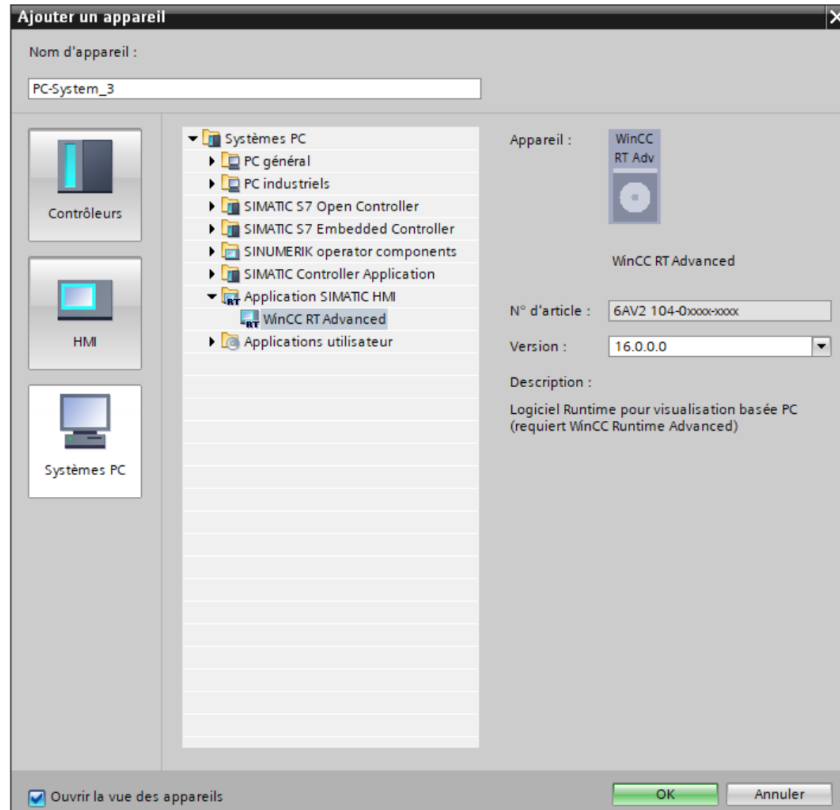


Figure 3.17: Fenêtre pour l'insertion d'un appareil WinCC RT pour création d'un IHM

3.2.6.3 Liaison entre l'API et l'IHM

Une fois l'IHM créée dans le projet, nous avons configuré correctement la communication entre le PC et l'API pour permettre le téléchargement du programme et de données. Cette étape garantit que tous les éléments du système sont connectés sur le même réseau et peuvent communiquer efficacement.

Pour établir la connexion entre le PLC et WinCC, vous devez commencer par cliquer sur **Appareils et réseaux**, puis sélectionnez le type de port de l'automate (Profinet, Profibus, MPI, PNE). Ensuite, cliquez sur le carré vert représentant le port de l'IHM situé au centre. Tracez une ligne de connexion du port de l'IHM vers le port de l'automate, en partant de droite vers la gauche.

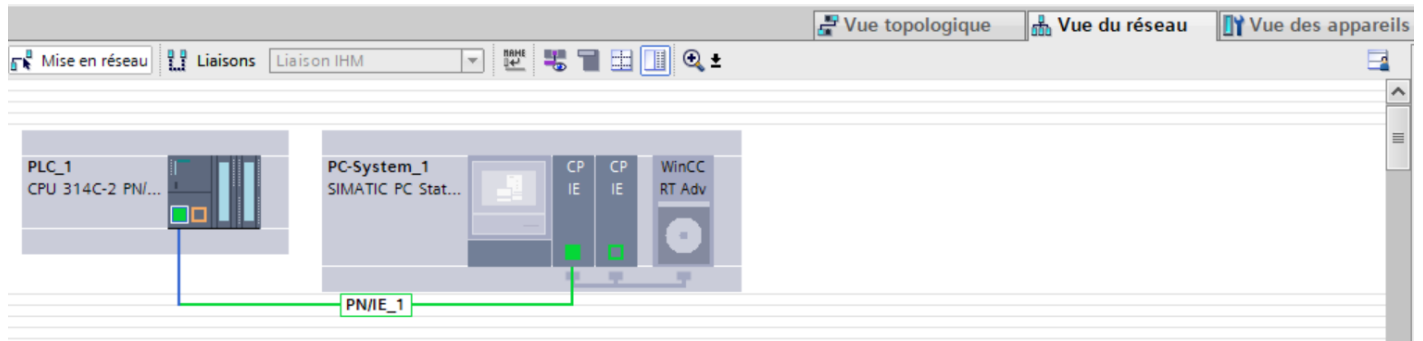


Figure 3.18: Liaison entre l'API et l'IHM

3.2.6.4 Configuration de l'interface de PG/PC

Il n'y aura pas d'établissement d'une communication entre le PC et l'API s'il n'y a pas une bonne configuration de de l'interface PG/PC particulièrement si vous passez de l'utilisation de PLCSim à un API réel. Dans le panneau de configuration du PC, ouvrez la boîte de dialogue "Paramétrage de l'interface PG/PC" via le menu "Outils Paramétrage de l'interface PG/PC..." et choisissez l'interface souhaitée dans la liste "Jeu de paramètres utilisé".

Dans le menu de l'IHM, sous l'onglet Connexion , ajouter le Nom et le Pilote de communication.

Dans l'onglet "Paramètres" , régler l'interface sur "ETHERNET" en vérifiant que les adresses IP ont le même sous-réseau.

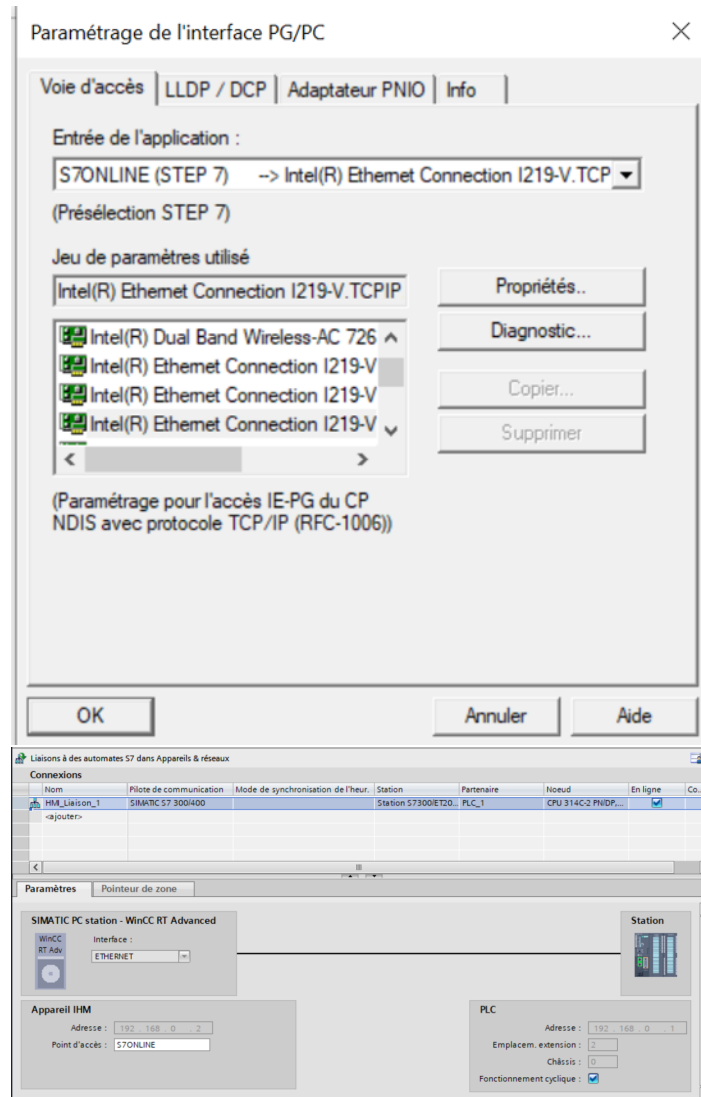


Figure 3.19: Configuration de l'interface PG/PC²

Création d'une variable IHM : exemple – Bond graphe pour affichage du niveau dans le réservoir

Pour créer une variable IHM pour le "capteur de niveau" par exemple, vous pouvez suivre les étapes suivantes :

1. Créez une nouvelle vue
2. Ajoutez un bond graphe à la vue en sélectionnant l'outil de bouton dans la barre d'outils. En cliquant sur la vue, le bouton apparaît.
3. Dans la fenêtre de propriétés du bouton, recherchez les propriétés pour lier le bouton au programme API.

4. Dans la propriété "Variable", entrez le nom de la variable que vous voulez lier au Bond graphe. Dans ce cas, entrez "capteur de niveau".

5. Dans la propriété "Variable", entrez le nom de la variable que vous voulez lier au "Variable pour max"; dans ce cas, entrez "volume maximale".

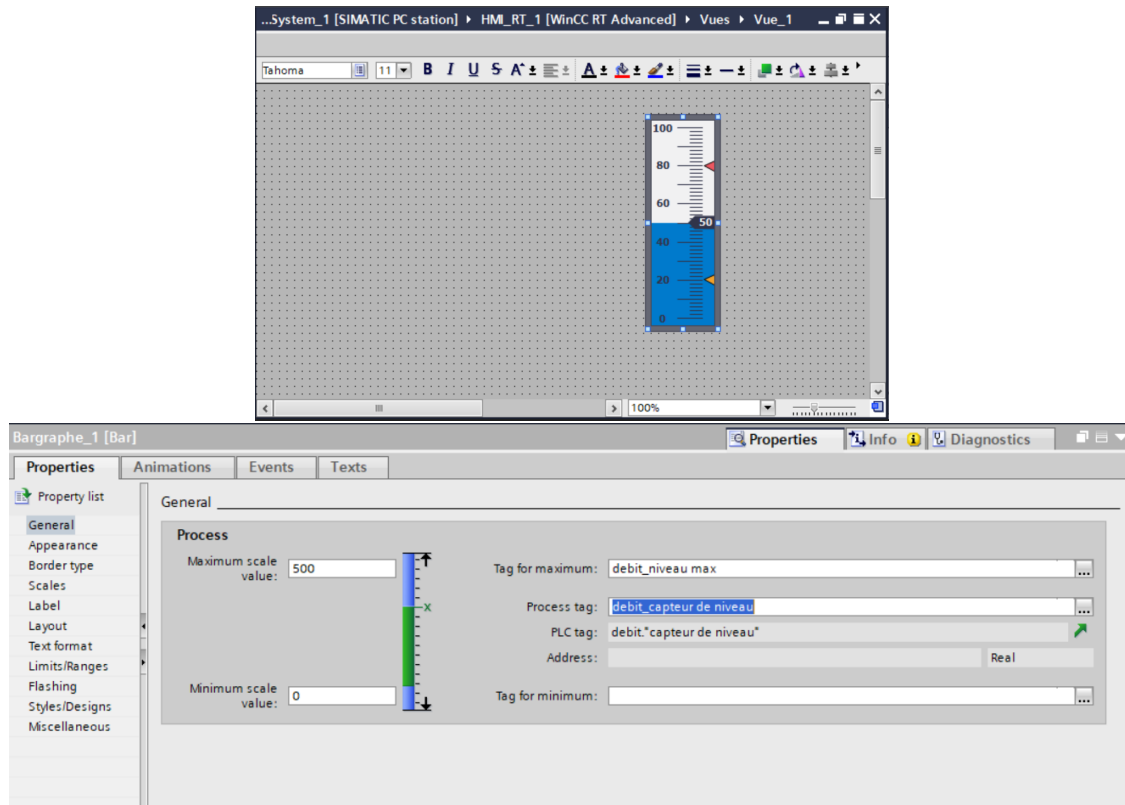


Figure 3.20: Création d'une variable IHM

3.2.6.5 Vue principale de l'IHM

Nous mettons dans cette vue :

- Les capteurs : 3 capteurs : de pression, de débit et du niveau;
- Les actionneurs : 02 vannes proportionnelles : PVC et PVD;
- Les champs d'entrées : pour la valeurs de la consigne des 03 grandeurs à réguler.

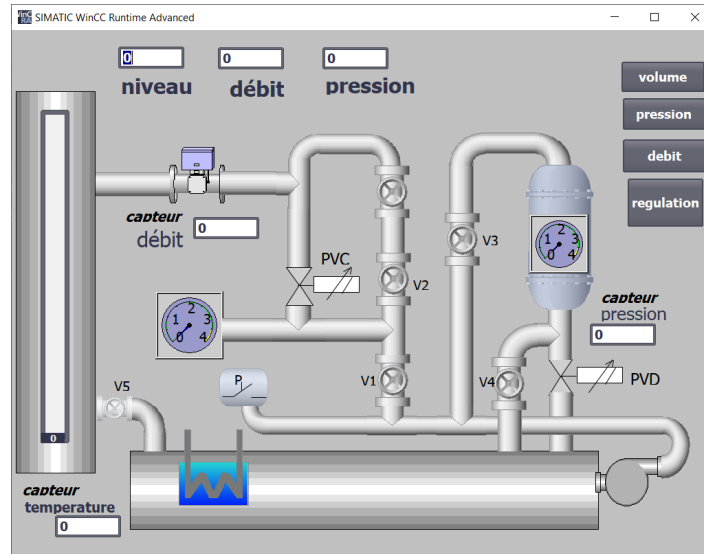


Figure 3.21: Interface IHM de l'unité externe mod. FLTP-U/EV

3.2.6.6 Vues secondaires de l'IHM

Dans les vues secondaires, nous pouvons réguler les correcteurs PID et voir les variations de variables (niveau, débit, pression). Cette vue commande les correcteurs comme suit :

- Les régulateurs sont activés quand les switches sont dans l'état ON (valeur logique "1")
- L'objet "champ d'E/S" permet la saisie et contrôler les valeurs de correcteurs (cas de l'entrée)
- L'objet "champ d'E/S" permet la saisie et l'affichage de valeurs de capteurs (cas de sortie)

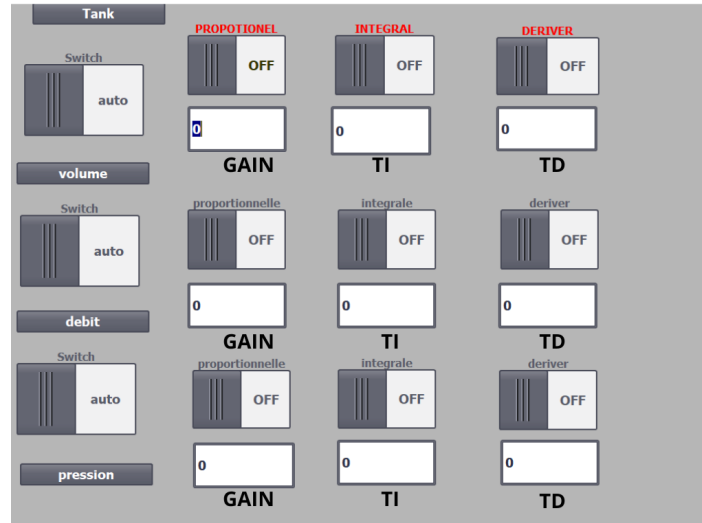


Figure 3.22: Vue secondaire de l'IHM

3.2.7 Câblage entre API et le système

Pour la communication entre API et le système, nous utilisons le panneau de commande du système FLTP/EV. Ce panneau contient :

- Entrées des transducteurs B, C et D.
- Afficheurs pour la lecture des valeurs de capteurs.
- Alimentation de la pompe avec en tension de 12V.
- Alimentation de vannes proportionnelles d'une tension variable de 0 à 24V.
- Alimentation de la résistance chauffante d'une tension variable de 0 à 48V.
- Interrupteur ON/OFF pour le contrôle de la pompe.
- Protection avec fusibles.

Câblage entre API et le système : cas de la pression

La figure suivante montre comment connecter l'API au panneau de commande et au banc didactique (Exemple de pression).

Dans le cadre de la supervision et du contrôle des installations industrielles, le Runtime dans WinCC Advanced se présente comme un environnement opérationnel essentiel. Cet outil informatique permet une gestion interactive, visuelle et sécurisée des processus en temps réel. Il s'agit d'un outil indispensable dans tout projet d'automatisation.

Exemple : Chauffage d'eau au niveau du réservoir '2'

La Figure 3.24 illustre une simulation en temps réel du prototype conçu pour le chauffage de l'eau. Afin d'optimiser les performances et de réduire le temps de chauffe, un circuit fermé a été mis en place pour recirculer l'eau préalablement chauffée. Ce dispositif permet d'accélérer le processus thermique.

Dans cette configuration spécifique, la résistance de chauffage, qui fonctionne à une tension de 48 v, est stratégiquement positionnée sur le côté droit du système, comme illustré dans la figure ci-jointe. Cette disposition a pour objectif de maximiser l'efficacité énergétique tout en minimisant les pertes thermiques.

Après avoir fini notre IHM qui va nous permettre de tester et vérifier notre banc d'essai, nous pouvons maintenant visualiser et enregistrer les réponses du système qui va nous permettre d'identifier les paramètres de notre correcteur PID.

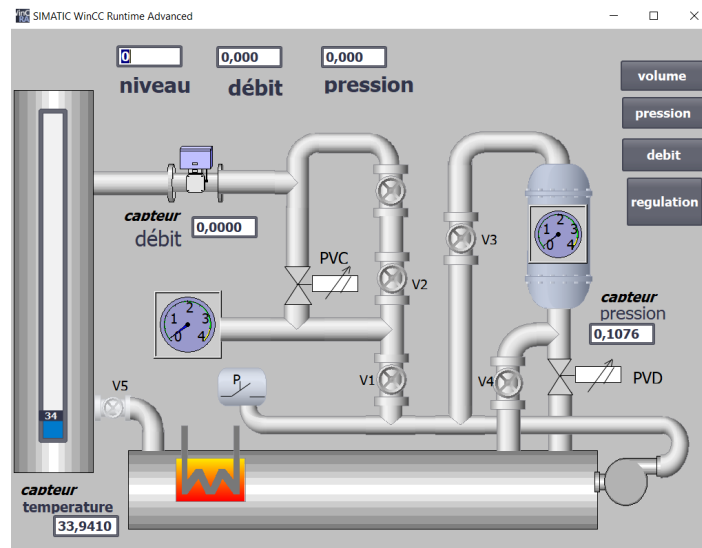


Figure 3.24: Simulation de notre IHM dans le cas la régulation de la temperature et de la pression

3.3 Identification des paramètres du correcteur PID

Après la connaissance du matériel, le câblage entre l'API et le système, le développement complet de notre IHM, nous allons traiter les réponses du systèmes des différentes grandeurs pour trouver les paramètres du correcteur.

3.3.1 Application de la méthode de Ziegler et Nichols sur les grandeurs physiques

En augmentant progressivement le gain 'Kp' du correcteur proportionnel seul, nous observons la réponse du système à un échelon d'entrée (ou une consigne). À chaque étape, nous analysons les graphes de sortie du système. Nous avons augmenté Kp jusqu'à atteindre un comportement oscillatoire pour les 04 grandeurs du système comme le montre les Figure 3.25, 3.26, 3.27 et 3.28.

Grandeur débit : choix de la consigne égale à '5L/mn'

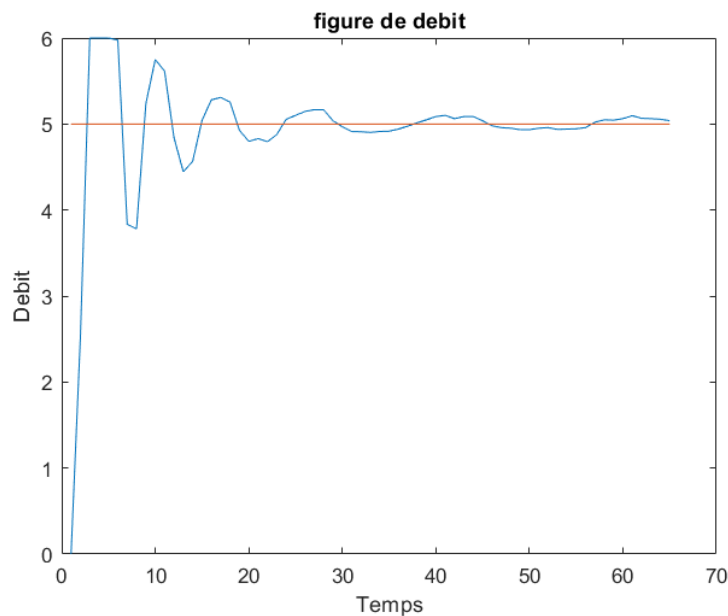


Figure 3.25: Réponse de la grandeur "Débit"

Grandeur niveau : choix de la consigne égale à '200 mm'

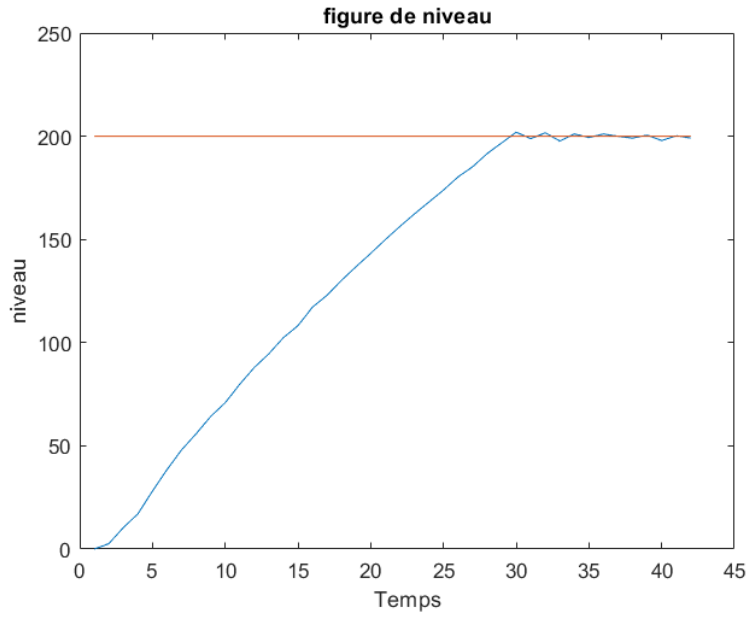


Figure 3.26: Réponse de la grandeur "Niveau"

Grandeur pression : choix de la consigne égale à '1 bar'

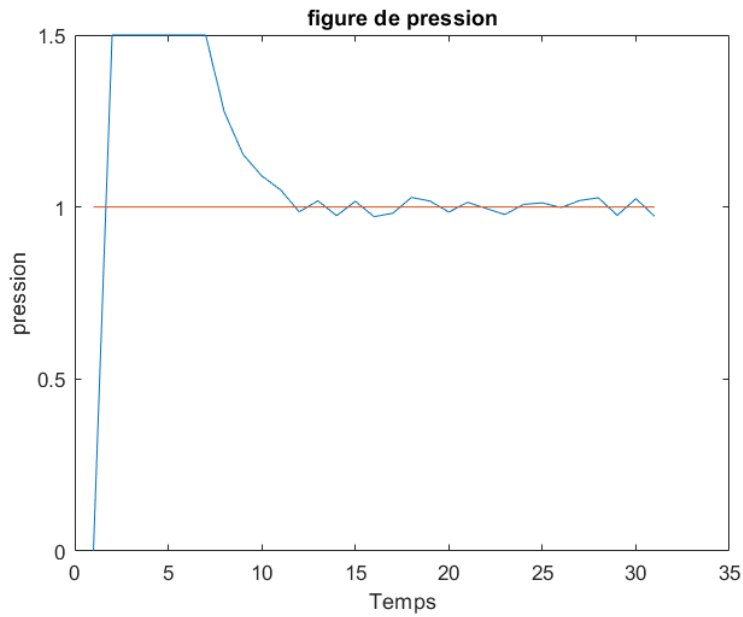


Figure 3.27: Réponse de la grandeur "Pression"

Grandeur température : choix de la consigne égale à '34°C'

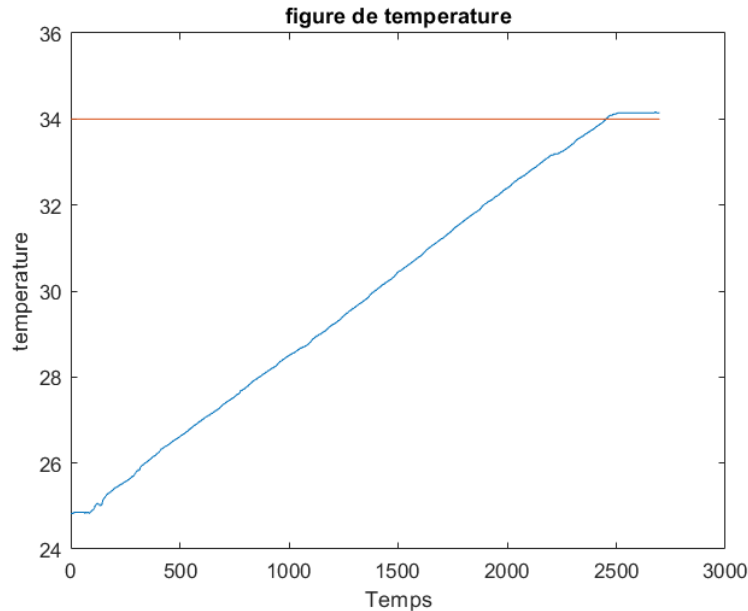


Figure 3.28: Réponse de la grandeur "Temperature"

Remarque : Nous avons constaté que pour la température, le temps de réponse (2400 s) s'est avéré très lent, donc la meilleure régulation pour ce cas est la régulation TOUT ou RIEN.

3.3.2 Détermination des paramètres du correcteur

Nous avons utilisé l'outil puissant de Matlab pour trouver les correcteurs P et I (seulement le régulateur PI, c'est suffisant). Le programme suivant montre comment déterminer les paramètres (nous avons besoin le temps T_u entre les deux premiers pics).

K_u : Gain permettant l'oscillation.

Code MATLAB

$Y=[y,1]$ matrice des valeurs de capteurs y ;

$Temp=[1,t]$ matrice de temp de taille (1,y);

Consigne =C;

Figure

Plot(temp,Y) courbe de capteur;

Hold on

Plot(temp) courbe de consigne;

Title (figure de paramètres);

Xlabel(le temps);

Ylabel(le paramètre);

Ku= gain limite;

[peaks, locs] = findpeaks(y, t);

Tu=locs(1)-locs(2) c'est le temp entre deux peaks;

Kp = 0.45 * Ku;

Ti = Tu / 1.2;

Te = temp de cycle.

Ki=(Kp*Te)/Ti;

Le tableau 3.1 montre les paramètres du PI trouvés pour différentes grandeurs.

Tableau des paramètres du PID

Type	K_p	K_i	K_u	T_i	T_u
Niveau	4.50	0.270	10	1.666	2
Débit	0.45	0.0077	1	5.833	7
Pression	0.45	0.0049	1	9.166	11

Table 3.1: Résultats obtenus

3.3.3 Résultats obtenus et interprétation.

Les graphes des grandeurs après application du correcteurs PI sont comme suit :

1. Grandeur débit

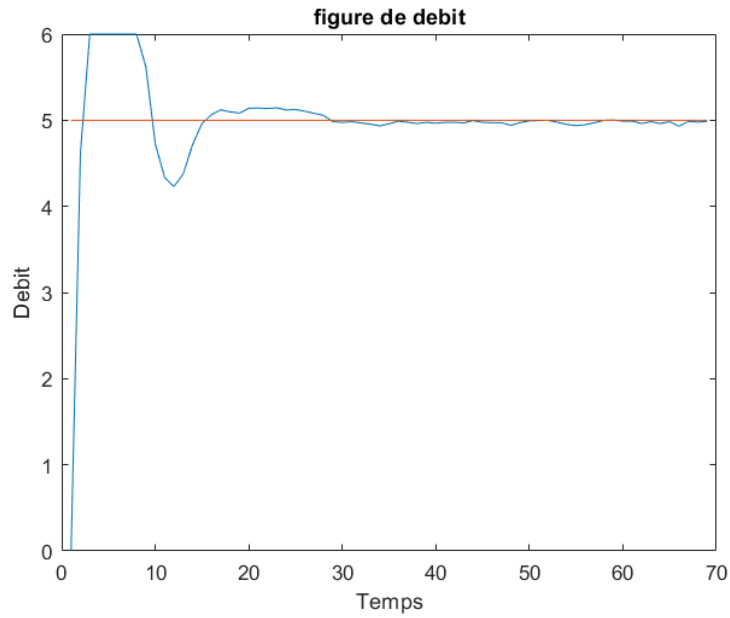


Figure 3.29: Réponse de la grandeur "Débit" après régulation

Interprétation :

Pour le temps de réponse, il est rapide car la pompe fournit un débit initial max de 6L/mn .

Nous avons enregistré un dépassement de 20% qui est tolérable pour ce type de grandeur. Nous avons noté que l'erreur statique est presque nulle.

2. Grandeur niveau

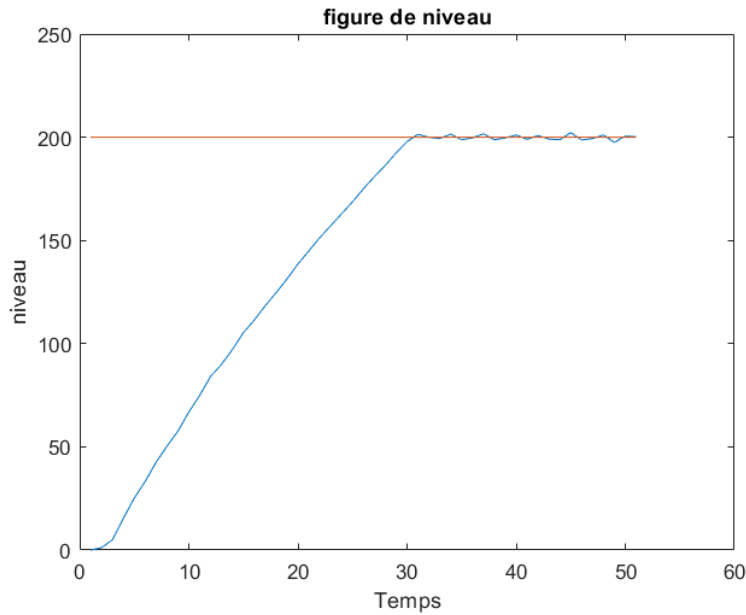


Figure 3.30: Réponse de la grandeur "Niveau" après régulation

Interprétation :

Le temps de réponse est acceptable (30 s) car le temps de remplissage 200mm (2L), pour une pompe de débit de 6L/mn, est de 20 s pour une débit sortant nul. Nous avons noté aussi une erreur statique presque nulle ce qui confirme l'efficacité de l'action intégrale (K_i) du régulateur pour éliminer les offsets.

3. Grandeur pression

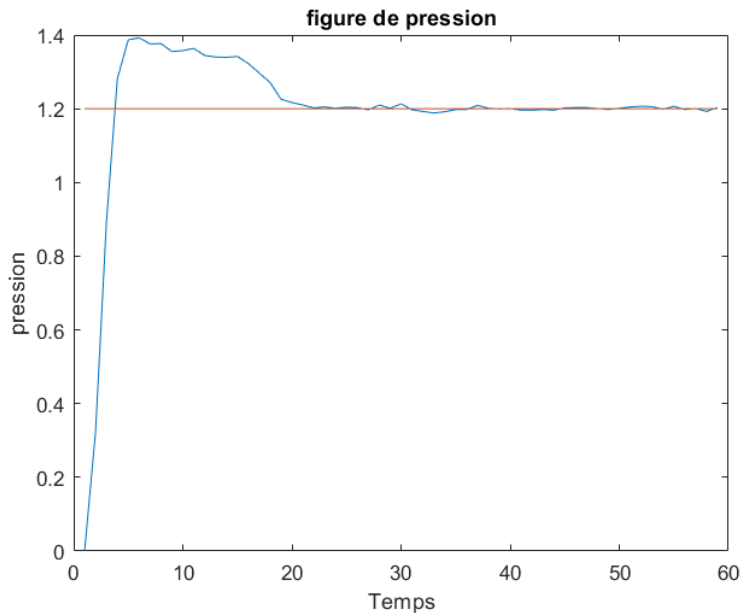


Figure 3.31: Réponse de la grandeur "Pression" après régulation

Interprétation :

Nous avons enregistré un temps de réponse rapide avec un dépassement tolérable de 15%. Aussi, L'erreur statique est nulle, donc le but tracé est atteint.

3.4 Conclusion

Ce chapitre a exploré l'implémentation des concepts de contrôle automatique sur un banc hydraulique expérimental (FLTP/EV).L'étude s'est appuyée sur une analyse détaillée des composants clés : une pompe ajustable, des vannes à commande proportionnelle, des capteurs analogiques et des réservoirs interconnectés.L'architecture opérationnelle a été conçue autour de l'automate Siemens S7-300, associé à la plateforme TIA Portal, offrant une intégration fluide entre équipements physiques et outils logiciels.

La configuration du module PID a été optimisée pour garantir une acquisition

précise des données (niveau, débit, pression) et un pilotage efficace des actionneurs. Une interface de contrôle sur mesure, développée avec WinCC Advanced, a permis une supervision interactive, combinant visualisation en temps réel et ajustement dynamique des paramètres.

L'emploi de la méthode empirique de Ziegler-Nichols a permis de calibrer les coefficients proportionnels et intégraux (K_p , K_i) pour chaque variable contrôlée. Les expérimentations menées ont mis en évidence des résultats prometteurs :

- Débit : Stabilisation rapide malgré un dépassement modéré 20%, compensé par une précision finale optimale.
- Niveau : Réglage cohérent avec le temps de remplissage du réservoir (30 s), sans oscillations résiduelles.
- Pression : Régulation stable, respectant les seuils opérationnels définis.

En conclusion, La régulation PI donne de bons résultats par rapport aux critères de performance de régulation, mais il faut faire preuve de prudence concernant le dépassement qui pourraient provoquer une défaillance du capteur.

Conclusion Générale

Ce projet a constitué une opportunité d'apprentissage pratique en matière de régulation industrielle, grâce à la conception et à la mise en œuvre d'un prototype initialement non fonctionnel. Bien que le câblage complet n'a jamais été réalisé et sans documentation, cette contrainte nous a conduit à mener une étude approfondie du système et de ses composants. En exploitant l'API S7-300 du laboratoire, notamment son objet technologique PID Compact, nous avons validé avec succès des régulations monovariabiles (niveau, débit, pression, température), obtenant des résultats satisfaisants.

Notre travail a permis aussi la mise en service opérationnelle du prototype, incluant le câblage et l'étalonnage des capteurs/actionneurs ;

La création d'une IHM interactive, pilotée par micro-ordinateur, a constitué une avancée majeure, intégrant des concepts clés de l'Industrie 4.0 et la supervision SCADA.

Cependant, ce projet n'a pas été sans défis car il y a eu des problèmes d'étalonnage. Il y avait un écart entre les valeurs du capteur et les mesures réelles. Il a donc fallu recalibrer le capteur.

Dans le cadre de l'apprentissage technique, la prise en main du système, qui était nouveau pour nous, a requis de la patience et une approche rigoureuse pour prévenir tout dommage potentiel.

Perspectives d'amélioration

Dans le cadre de notre engagement constant à optimiser l'efficacité de nos systèmes, nous procéderons à la mise à niveau de l'API S7-300 vers des modèles plus récents, tels que les S7-1200 ou S7-1500. Cette initiative stratégique nous permettra d'améliorer significativement les performances et la fiabilité de nos systèmes.

Dans le cadre de la régulation multivariable, il est essentiel d'élargir le contrôle à plusieurs paramètres simultanés. Cette approche nécessite une méthodologie système plus élaborée, impliquant une gestion plus complexe.

Dans le cadre de notre démarche d'intégration de l'intelligence artificielle, nous explorons des algorithmes prédictifs afin d'optimiser nos processus.

En conclusion, ce projet a permis de renforcer la compréhension des systèmes automatisés, tout en soulignant l'importance des bases théoriques et de la méthodologie rigoureuse. Les compétences acquises ouvrent la voie à des applications industrielles plus ambitieuses, alliant précision, innovation et interconnexion technologique.

Portée pédagogique et industrielle

Au-delà des résultats techniques, ce projet offre un outil pédagogique innovant pour la formation à l'automatisation, tout en proposant des solutions transférables à des applications réelles (stations d'épuration et réseaux urbains). Les défis rencontrés - de l'étalonnage des capteurs à la gestion des interactions multivariées - soulignent l'importance d'une approche systémique qui combine rigueur théorique et flexibilité pratique.

ANNEXE

Tableau des Entrées

Adresse	Nom du Capteur	Type de Signal	Description
IW139	Capteur de niveau	Analogique	Mesure le niveau de liquide dans une cuve ou un réservoir
IW141	Capteur de débit	Analogique	Mesure le débit du fluide dans la conduite
IW143	Capteur de pression	Analogique	Mesure la pression dans le système

Table 3.2: Adresse des Entrées

Tableau des Sorties

Adresse	Nom de l'Actionneur	Type de Signal	Description
QW139	Vanne PVC	Analogique	Commande l'ouverture ou la fermeture de la vanne PVC
QW141	Vanne PVD	Analogique	Commande l'ouverture ou la fermeture de la vanne PVD

Table 3.3: Adresse des Sorties

Stockage de variables

un bloc de données (DB) est une zone de mémoire structurée utilisée pour stocker des variables :

	Nom	Type de données	Décalage	Valeur de départ	Rémanence	Visible da...	Valeur ...
1	Static						
2	correcteur debit	Bool	0.0	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3	vanne debit	Dint	2.0	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4	vanne debit reel	Real	6.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5	man on 2	Bool	10.0	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6	vanne debit int	Int	12.0	0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7	propotionelle 2	Bool	14.0	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
8	integrale 2	Bool	14.1	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
9	derivee 2	Bool	14.2	false	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
10	gain 2	Real	16.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
11	td 2	Time	20.0	T#0ms	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
12	ti 2	Time	24.0	T#0ms	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
13	consigne debit	Real	28.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
14	capteur debit	Real	32.0	0.0	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figure 3.32: Bloc DB

Entrées / Sorties du PID

la figure suivant represente le bloc PID dans TIA Portal.

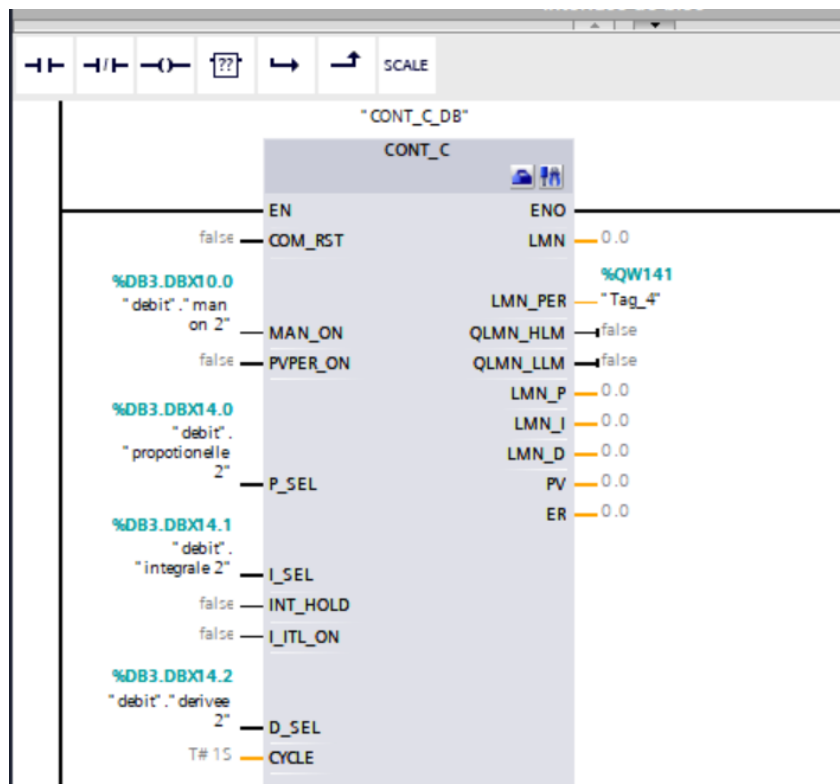


Figure 3.33: Bloc PID

Paramètres d'entrée CONT C

MAN ON : Activation mode manuelle ou mode automatique

P SEL : L'action P est active quand cette entrée est à 1.

I SEL : L'action I est active quand cette entrée est à 1.

D SEL : L'action D est active quand cette entrée est à 1.

SP INT : Entrée consigne.

PV IN : Entrée la valeur de mesure.

GAIN : Entrée "Coefficient d'action proportionnelle".

TI : Entrée "Temps d'intégration".

TD : L'entrée "Temps de dérivation".

Paramètres de sortie CONT C

LMN : Valeur de réglage.

LMN PER : Valeur de réglage en format périphérie.

Bibliography

- [1] The Engineering ToolBox. Site web. Consulté en octobre 2024.
- [2] Polycopié de cours : Régulation industrielle, 20XX.
- [3] ALJ Consulting. Ouvrir la voie du succès numérique : combinaison de l'industrie 4.0 et du lean management, 2025. Consulté le: 2025-04-05.
- [4] Prénom Auteur. Titre du mémoire ou de l'article. <http://dspace.univ-tlemcen.dz/handle/112/16959>, 2023. Consulté le 10 avril 2025.
- [5] Auteur inconnu. Polycopié de cours: Régulation industrielle. Document PDF universitaire - Disponible localement, 20XX.
- [6] Auteur inconnu. Régulation industrielle. PDF disponible en ligne, 20XX. Consulté le: 2025-04-05.
- [7] Automatismes. Tia portal - prise en main.
- [8] Bilal Babayigit and Mohammed Abubaker. Industrial internet of things: A review of improvements over traditional scada systems for industrial automation. *IEEE Systems Journal*, 18(1):120–133, 2023.
- [9] Somudeep Bhattacharjee and Champa Nandi. Implementation of industrial internet of things in the renewable energy sector. *The Internet of Things in the industrial sector: security and device connectivity, smart environments, and industry 4.0*, pages 223–259, 2019.

- [10] Leila Boucerredj. Régulation industrielle. Cours de Régulation Industrielle, Université 8 Mai 1945 Guelma, 2023. 2021–2022.
- [11] Éric Brunet. Thermodynamique : fondements et premières applications. PDF - Disponible en ligne, 2015. Cours de thermodynamique, Université Pierre et Marie Curie (UPMC).
- [12] Conrad Electronic Suisse. 7 avantages des automates programmables industriels (api), 2023. Consulté le: 2025-04-05.
- [13] Département de Génie Électrique et Automatique. Tp régulation du niveau d'eau dans un réservoir, 2024. Document interne.
- [14] Elettronica Veneta. *Système multivariable de contrôle de processus mod. FLTP/EV*. Padova, Italy, 2019. Fiche produit et manuel PDF. Disponible: <https://www.elettronicaveneta.com/wp-content/uploads/2019/10/FLTP-26D-F-CP-2.pdf>.
- [15] ETIC Telecom. *Télémaintenance d'un automate Siemens S7-300 / S7-400 via MPI / Profibus*, 2018. Consulté le: 2025-04-05.
- [16] Faculté des Sciences - Université Mouloud Mammeri (UMC). Actionneurs hydrauliques - introduction à l'hydraulique industrielle, 2023. Consulté le: 2025-04-05.
- [17] Simon Fahle, Christopher Prinz, and Bernd Kuhlenkötter. Systematic review on machine learning (ml) methods for manufacturing processes—identifying artificial intelligence (ai) methods for field application. *Procedia CIRP*, 93:413–418, 2020.
- [18] Amine Abdelhafidh FERSADOU and Nassima Encadre par TARTAR. *L'évaluation du confort acoustique dans un auditorium universitaire Cas*

d'étude: Auditorium MALEK BEN NABII Université Larbi Tébessi-Tébessa.

PhD thesis, 2022.

- [19] Fortinet. Qu'est-ce que scada et le système scada ? <https://www.fortinet.com/fr/resources/cyberglossary/scada-and-scada-systems>, 2024. Consulté le 13 mai 2025.
- [20] IP-Systèmes. Qu'est-ce qu'un automate programmable industriel (api), 2024. Consulté le: 2025-04-05.
- [21] ISTA - Réseaux. Câbles droits et câbles croisés UTP, 2015. Consulté en juin 2025. Contient une image comparative des câbles Ethernet droits et croisés.
- [22] ISTE Group. *Digitalisation et Contrôle de Systèmes Industriels Cyber-Physiques*. ISTE Éditions, London, UK, 2023. Disponible à l'adresse : <https://www.istegroup.com/fr/produit/digitalisation-et-controle-de-systemes-industriels-cyber-physiques/> (consulté le 15 mai 2025).
- [23] Mohd Javaid, Abid Haleem, Ravi Pratap Singh, and Rajiv Suman. Enabling flexible manufacturing system (fms) through the applications of industry 4.0 technologies. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 2:49–62, 2022.
- [24] Jungheinrich Profishop. Guide sur l'hydraulique : Fonctionnement et applications, 2023. Consulté le: 2025-04-05.
- [25] Pradeep Kumar. Industrial automation and control systems: Principles and applications, 2019.
- [26] Lab4Sys. Maîtrisez STEP 7 TIA Portal : Devenez un expert en programmation d'automates.

- [27] Mansour Zoubeirou A Mayaki. *Méthodes d'apprentissage profond pour la détection d'anomalies et de changement de régimes: application à la maintenance prédictive dans des systèmes embarqués*. PhD thesis, Université Côte d'Azur, 2024.
- [28] Fairuz Suzana Mohd Chachuli, Norasikin Ahmad Ludin, Muhamad Alias Md. Jedi, and Norul Hisham Hamid. Transition of renewable energy policies in malaysia: Benchmarking with data envelopment analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152:111739, 2021.
- [29] NOVAE Recrute. Plc - automates programmables industriels, 2024. Consulté le: 2025-04-05.
- [30] Proaction International. Infographie : Familles technologiques de l'Industrie 4.0. Disponible à l'adresse : https://blog.proactioninternational.com/hs-fs/hubfs/ARTICLES/Familles%20de%20technologies/Infographie_Industrie%204.0_Familles%20technologiques.png?width=3334&name=Infographie_Industrie%204.0_Familles%20technologiques.png, 2024. Consulté le: 2025-04-05.
- [31] Dale E. Seborg, Thomas F. Edgar, and Duncan A. Mellichamp. *Process dynamics and control*, 2010.
- [32] Dale E. Seborg, Thomas F. Edgar, Duncan A. Mellichamp, and Francis J. Doyle. *Process dynamics and control*, 2016.
- [33] Siemens. Totally integrated automation portal (TIA Portal).
- [34] Siemens. PROFIBUS – Industrial communication, 2024. Image illustrative de PROFIBUS. Consulté en juin 2025.

- [35] Siemens AG. *S7-CPS-PB: Module d'alimentation pour automates SIMATIC S7*, 2004. Documentation technique. Disponible sur Industry Support de Siemens.
- [36] Siemens AG. Digital twin: The virtual mirror of your production. <https://new.siemens.com/global/en/industries/industry-4-0/digital-twin.html>, 2024. Consulté le 13 mai 2025.
- [37] Siemens Industry. *CPU 312 IFM / CPU 314 IFM / CPU 315-2 DP / CPU 316-2 DP / CPU 317-2 DP / CPU 318-2 DP Handbook*, 2004. Documentation technique. Consulté en ligne via Siemens Industry Online Support.
- [38] Siemens Industry Mall. Presostat DAN - 5000013. https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fmall.industry.siemens.com%2Fmall%2Ffr%2Fww%2Fcatalog%2Fproducts%2F5000013%3Ftree%3DCatalogTree%26activeTab%3Dproduct%26regionUrl%3D%2F&psig=AOvVaw2FwnZYciirWbhDT9nJ-UFR&ust=1747513963149000&source=images&cd=vfe&opi=89978449&ved=0CBcQjhxqFwoTCNDDg_zqqI0DFQAAAAAdAAAAABAE. Accessed: 2025-04-05.
- [39] Technologie Pro. Les automates programmables industriels (api), 2017.
- [40] Technologie Pro. Les automates programmables industriels (api), 2017. Consulté le: 2025-04-05.
- [41] Tom Poub. Correcteurs pid : Méthodes de ziegler-nichols, 20XX.
- [42] Université de Constantine 1. Régulation industrielle, 2018. Consulté en mai 2025.
- [43] Université de Guelma. Polycopie de cours de régulation industrielle, 2025. Consulté en mai 2025.

- [44] Ville de Paris. Rapport sur le prix et la qualité du service public de l'eau potable – exercice 2021. https://cdn.paris.fr/paris/2022/11/25/rpqs-eau-2021_25_11-22-web-sL7z.pdf, novembre 2022. Consulté en mai 2025.
- [45] Frank M. White. *Mecánica de fluidos*, 5ta edición, 2001. Traducción al español.
- [46] Wikipédia. *Automate programmable industriel*, 2025. Page consultée le: 2025-04-05.
- [47] Keliang Zhou, Taigang Liu, and Lifeng Zhou. Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. In *2015 12th International conference on fuzzy systems and knowledge discovery (FSKD)*, pages 2147–2152. IEEE, 2015.

Résumé

Ce mémoire porte sur l'étude du contrôle et de la supervision d'un système multivariable intégrant plusieurs grandeurs physiques telles que le débit, la température et la pression. L'implémentation a été réalisée au sein du laboratoire d'automatique de l'Université de Tlemcen, en utilisant un automate programmable S7-300 de Siemens, ainsi que le logiciel WinCC pour l'interface homme-machine et la supervision en temps réel. L'objectif principal est d'appliquer une commande de type PID sur chaque variable afin d'évaluer la capacité du système à suivre les consignes de manière stable et précise. Les résultats obtenus ont mis en évidence un comportement satisfaisant du système, avec une régulation efficace et une bonne stabilité dynamique.

Mots-clés : Système multivariable, API S7-300, supervision, PID, WinCC, automatisation industrielle.

المخلص

تعالج هذه المذكرة موضوع التحكم والإشراف على نظام متعدد المتغيرات يشمل قياسات فيزيائية مختلفة مثل التدفق، الحرارة، والضغط. تم تنفيذ الدراسة على مستوى مخبر من شركة S7-300 المتحكم الآلي بجامعة تلمسان، باستخدام وحدة التحكم القابلة للبرمجة يهدف. لواجهة المستخدم والمراقبة اللحظية WinCC ، بالإضافة إلى برنامج Siemens على كل متغير لتقييم أداء النظام من حيث التتبع العمل إلى تطبيق تحكم من نوع والاستقرار. وقد أظهرت النتائج أن النظام أظهر سلوكًا مقبولًا وتحكمًا فعالًا في المتغيرات محل الدراسة

الكلمات المفتاحية:

نظام متعدد المتغيرات، API S7-300، تحكم PID ، WinCC ، الأتمتة الصناعية، المراقبة

Abstract

This thesis focuses on the control and supervision of a multivariable system involving several physical quantities such as flow, temperature, and pressure. The implementation was carried out in the automatic control laboratory at the University of Tlemcen using a Siemens S7-300 PLC, and WinCC software for human-machine interface and real-time supervision. The main objective was to apply PID control on each variable to assess the system's ability to follow setpoints with stability and accuracy. The obtained results demonstrated satisfactory behavior of the system, with effective regulation and good dynamic performance.

Keywords: Multivariable system, S7-300 PLC, PID control, WinCC, industrial automation, supervision.